www.oeko.de

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität: Welche Chancen und Risiken ergeben sich durch die Digitalisierung?

Abschlussbericht zum Vorhaben 1000333379 der KfW

Freiburg/Berlin
01.07.2021

Autorinnen und Autoren

Öko-Institut e.V.

Carl-Otto Gensch
Felix Behrens
Sibylle Braungardt
Peter Gailhofer
Jens Gröger
Jürgen Sutter

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH

Melanie Degel
Kerstin Fritzsche
Steffen Bauer
Lisa Steck

Kontakt
info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin
Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Kontakt IZT

Melanie Degel
IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
gemeinnützige GmbH
Schopenhauerstraße 26
14129 Berlin
Telefon +49 (0) 30 80 30 88-22

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 6

Tabellenverzeichnis 6

Verzeichnis der Boxen 7

Abkürzungsverzeichnis 8

Zusammenfassung 11

Summary 20

1 Einleitung 28

1.1 Hintergrund und Ziele der Studie 28

1.2 Unser Verständnis von Digitalisierung 29

1.3 Bewertung der Auswirkungen digitaler Technologien 30

2 Status quo und Trends der Digitalisierung in Deutschland 32

2.1 Stand der Digitalisierung in Deutschland 32

2.1.1 Datenvolumen und digitale Infrastrukturen 33

2.1.2 Digitalisierung der Wirtschaft und IKT-Sektor 35

2.1.3 Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung 37

2.1.4 Digitalisierung privater Haushalte 37

2.2 Digitalisierungstrends 38

3 Digitalisierung und Klimaschutz 42

3.1 Digitalisierung in der klima- und umweltpolitischen Diskussion 42

3.2 Chancen der Digitalisierung für den Klimaschutz – Grundzüge in einzelnen Sektoren 45

3.2.1 Digitalisierung der Energiewirtschaft 46

3.2.1.1 Virtuelle Kraftwerke 46

3.2.1.2 Flexibilitätsplattformen 48

3.2.2 Digitalisierung im Bereich Verkehr 51

3.2.2.1 Mobile Arbeit 51

3.2.2.2 Platooning im Güterverkehr 53

3.2.3 Digitalisierung im Bereich Gebäude 55

3.2.3.1 Digitale Technologien zur seriellen Sanierung 56

3.2.3.2 Smart Home im Bereich Heizungssteuerung 57

3.2.4 Digitalisierung im Bereich Industrie 60

3.2.4.1 Demand Side Management Chemische Industrie 60
3.2.4.2 Smart Manufacturing 64
3.3 Zwischenfazit 66
4 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der Digitalisierung 68
4.1 Überblick 68
4.2 Strombedarf der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in Deutschland 68
4.3 Direkte Effekte digitaler Technologien auf den Klimaschutz 71
4.4 Berechnungen des individuellen digitalen CO_2-Fußabdrucks 73
4.5 Einflussfaktoren und Trends von Energieverbrauch 77
4.5.1 Entwicklung der Prozessorrechenleistung 77
4.5.2 Trends im Bereich Rechenzentren 78
4.5.3 Trends im Bereich Telekommunikationsnetze 80
4.5.4 Trends im Bereich Endgeräte 80
4.6 THG-Minderungspotenziale bei Endgeräten und in der IKT-Infrastruktur 81
4.6.1 Effiziente Endgeräte 81
4.6.2 Verlängerung der Nutzungsdauer von IKT-Geräten 82
4.6.3 Effiziente Software 84
4.6.4 Effiziente Rechenzentren 85
4.6.5 Einsatz von Erneuerbaren Energien für die Stromversorgung von IKT-Infrastruktur 88
4.7 Berechnung des CO_2-Fußabdrucks an Beispielen 89
4.7.1 HD-Videostreaming 89
4.7.2 Home-Office / Mobiles Arbeiten 91
4.7.3 Videokonferenzen im beruflichen Kontext 94
4.8 Zwischenfazit 96
5 Wie steuern: Politische Instrumente zur klimaneutralen Ausrichtung der Digitalisierung 98
5.1 Kontextregulierung: „Analoge“ Rahmenbedingungen für digitale Anwendungen und Geschäftsmodelle anpassen 99
5.2 Zielvorgaben und Standards für Entwicklung und Betrieb digitaler Anwendungen – „Greening IT“ 100
5.3 Algorithmenregulierung: „Umweltziele in die Algorithmen“? 104
5.4 Umweltpolitische Weichenstellungen durch Regulierung und Governance von Daten? 106
5.5 Zwischenfazit 110

6 Literaturverzeichnis 112

8 Anhang 125

Anhang I. Struktur und Indikatoren des DESI der Europäischen Union 125

Anhang II. Datengrundlage für die Berechnung des Klima-Fußabdrucks an Beispielen 128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Digital Economy and Society Index (DESI) 2020: Deutschland im europaweiten Vergleich 33

Abbildung 2: Einschätzung des eigenen Digitalisierungsstands aus Unternehmensperspektive 36

Abbildung 3: Elektrischer Jahresenergiebedarf der IKT in Deutschland 2010 – 2025 (Basisprognose) 70

Abbildung 4: Digitaler CO_2-Fußabdruck bei angenommener durchschnittlicher (oben) und intensiver (unten) Nutzung in Deutschland 76

Abbildung 5: Energieverbrauch pro Rechenoperation seit ENIAC Computer (Koomeysches Gesetz) 78

Abbildung 6: Globaler Energieverbrauch durch Rechenzentren 79

Abbildung 7: Vergleich des Energieverbrauchs eines lokalen Geräts bei der Ausführung verschiedener Software-Produkte unter definierten Standardnutzungsszenarien 85

Abbildung 8: CO_2-Fußabdruck für 3,5 Stunden Fernsehen per Videostream 90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick Begriffsverständnisse Digitalisierung 30

Tabelle 2: Überblick des Digital Economy and Society Index 32

Tabelle 3: Darstellung der Breitbandverfügbarkeit nach Gemeindeprägung (städtisch, halbstädtisch, ländlich) in % der Haushalte 34

Tabelle 4: Anzahl der Rechenzentren in Deutschland nach Rechenzentrumskategorie in den Jahren 2007, 2013 und 2017 35

Tabelle 5: Abschätzung der direkten THG-Emissionen in Deutschland durch die Digitalisierung 72

Tabelle 6: Eingangsdaten für durchschnittliche und intensive Nutzung digitaler Geräte und Dienstleistungen 75

Tabelle 7: Potenziell mögliche Energieeinsparungen durch ausgewählte GreenIT-Maßnahmen im Bereich von Endgeräten in einer Landesverwaltung 81

Tabelle 8: Strategien gegen Obsoleszenz 83

Tabelle 9: Maßnahmenbereiche, Maßnahmen und beispielhafte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren 87

Tabelle 10: Datenmengen für Videostreaming (pro Stunde) 90

Tabelle 11: CO_2-Einsparpotenziale durch Telearbeit in Deutschland 91

Tabelle 12: Definition von Szenarien zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks für Home-Office / Mobiles Arbeiten 93

Tabelle 13: CO_2-Fußabdruck für Home-Office / Mobiles Arbeiten für zwei Szenarien – alle Zahlenangaben in kg CO_2e pro Jahr (220 Arbeitstage) 93

Tabelle 14: CO_2-Fußabdruck Videokonferenzen im beruflichen Kontext – alle Zahlenangaben in kg CO_2e pro Jahr (220 Arbeitstage) 95

Tabelle 15: Anforderungen auf der Grundlage der Ökodesign-Richtlinie der EU für relevante Produktgruppen im Kontext der Digitalisierung 101

Verzeichnis der Boxen

Box 1: Grundsätze der Umweltpolitischen Digitalagenda des BMU 43

Box 2: Die Corona-Pandemie als Chance für eine klimafreundliche Digitalisierung? 44

Box 3: Verknüpfung von Förderprogrammen mit Anforderungen an nachhaltiges Wirtschaften 104

Box 4: Digitale Innovationen als Herausforderung für vorausschauende Regulierung 109

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Bitkom	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
CO_2	Kohlendioxid
CO_2e	Kohlendioxidäquivalente
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
DLT	Distributed ledger technology
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde (Datenübertragungsrate)
GWP	Global Warming Potential = Treibhauspotential
HD	High Definition
HFC	Hybrid Fiber Coax = hybride Glasfaser- und Koaxialkabelnetze
IEA	Internationale Energieagentur
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnologie
KEA	Kumulierter Energieaufwand = Primärenergiebedarf
KI	Künstliche Intelligenz

KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KSG	Klimaschutzgesetz des Bundes
Mbit/s	Megabit pro Sekunde (Datenübertragungsrate)
ML	Maschinelles Lernen
Mt	Megatonne
Mtoe	Millionen Tonnen Öläquivalent
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OZG	Gesetz zur Verbesserung des Onlinezugangs zu Verwaltungsleistungen, kurz Onlinezugangsgesetz
PUE	Power usage effectiveness
RZ	Rechenzentrum
THG	Treibhausgase
VR	Virtual Reality
VK	Virtuelles Kraftwerk

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Die Digitalisierung bestimmt bereits gegenwärtig in hohem Umfang alle Lebens- und Arbeitsbereiche und es ist unbestritten, dass die Bedeutung digitaler Technologien und Geschäftsmodelle noch weiter zunehmen wird. Die Digitalisierung prägt schon heute stark die Art, wie wir leben, kommunizieren, arbeiten, wirtschaften und konsumieren, sie wird daher auch als Auslöser eines Wandels bzw. Transformationsprozesses angesehen. Dabei handelt es sich nicht um einen ausschließlich technologischen und wirtschaftlichen, sondern um einen gesamtgesellschaftlichen Prozess. Prägende Entwicklungen für diesen Wandel sind vor allem

- die Nutzung digitaler Geräte und Daten in allen Lebens- und Arbeitsbereichen, insbesondere getrieben durch die Zunahme mobiler Endgeräte und deren Infrastruktur;
- die globale Vernetzung von verteilten Geräten und Nutzern, die die Digitalisierung von Produktions- und Handelsprozessen ermöglicht (vernetzte Maschinen, durch Algorithmen gesteuerter Handel);
- das starke Wachstum von Datenmengen und Datenübertragung und die Auslagerung der Datenverarbeitung von Einzelgeräten in zentrale Rechenzentren (Cloud-Computing, Cloud-Storage);
- die hohe und zunehmende wirtschaftliche Bedeutung strukturierter Daten aus dem Nutzungsprozess als Produktionsfaktor und Daten als Bestandteil von Dienstleistungen;
- der Ausbau der sogenannten Mensch-Maschine-Schnittstelle (etwa durch Sprachsteuerung) und die Entwicklung von lernenden, selbst programmierenden Systemen bis hin zu künstlicher Intelligenz.

Bis zum Jahr 2030 soll gemäß Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes der Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland um mindestens 65 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden, bis zum Jahr 2045 soll Deutschland klimaneutral werden. In der Diskussion um den dafür erforderlichen klimaneutralen Umbau zentraler wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bereiche, wie etwa Industrie, Energieversorgung, Verkehr, Landwirtschaft und Wohnen, wird häufig das Potenzial der Digitalisierung hervorgehoben. Digitale Technologien und Anwendungen, wie etwa Künstliche Intelligenz und das Internet der Dinge („Internet of things“ – IoT), so das Argument, können einen wichtigen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen, zur Vermeidung von Treibhausgasen und zur Umsetzung nachhaltiger Produktions- und Konsumweisen leisten. Allerdings sind die Auswirkungen der Digitalisierung auf den Klimawandel höchst ambivalent und werden kontrovers diskutiert. So waren im Jahr 2020 weltweit zwischen 1,8 und 3,2 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen direkt auf Informations- und Kommunikationstechnologien zurückzuführen.

Vor diesem Hintergrund zielt diese Studie darauf ab, die Wechselwirkungen zwischen Digitalisierung und Klimaschutz zu analysieren. Konkret soll die Studie Antworten auf folgende Fragestellungen geben:

- Wie ist der Stand der Digitalisierung in Deutschland? Was sind die wichtigsten Entwicklungstrends?

- Welche konkreten Chancen und Ansatzpunkte bietet die Digitalisierung für die Erreichung anspruchsvoller Klimaschutzziele in Deutschland?
- Welcher Energieverbrauch ist mit der Digitalisierung in Deutschland verbunden? In welcher Höhe liegen die Treibhausgasemissionen durch die Digitalisierung? Was sind die wesentlichen Treiber und wo liegen Minderungspotenziale?
- Welche politischen Instrumente sind für eine klimaneutrale Ausrichtung der Digitalisierung notwendig?

Die vorliegende Studie basiert auf einer Auswertung der Fachliteratur und statistischer Daten, eine eigene Datenerhebung war nicht Gegenstand der durchgeführten wissenschaftlichen Arbeit.

Ergebnisse

Deutschland rangiert gemessen am DESI, dem Digital Economy and Society Index (DESI) der Europäischen Union, an zwölfter Stelle von 28 Ländern und damit knapp vor dem europäischen Durchschnitt. Besonders positiv auf die Bewertung wirken sich dabei die guten grundlegenden digitalen Fähigkeiten und Software-Kompetenzen der Bevölkerung, wie auch die aktive Internetnutzung durch Privatpersonen aus. In Bezug auf Konnektivität erzielt Deutschland sehr gute Werte bei der Bereitschaft für den neuen Mobilfunkstandard 5G, den Breitbandpreisen und der allgemeinen Festnetz-Breitbandnutzung. Allerdings rangiert das Land weiter unterhalb des europäischen Durchschnitts was die Abdeckung mit Netzen mit sehr hoher Kapazität betrifft, zudem wirken sich der geringe Digitalisierungsgrad öffentlicher Dienstleistungen und die relativ schwache Durchdringung und Nutzung digitaler Technologien in der deutschen Wirtschaft negativ auf den Rang Deutschlands im DESI aus. Infrastrukturen zur Datenübertragung, -speicherung und -verarbeitung sind das Rückgrat der Digitalisierung in Deutschland und gewinnen mit der Ausbreitung digitaler Anwendungen und damit verbundenen steigenden Datenvolumen immer mehr an Bedeutung. Allein zwischen 2012 und 2019 hat sich die jährliche Datenübertragung durch Breitbandanschlüsse im Festnetz laut Analysen und Berechnungen der Bundesnetzagentur von 7 Mrd. Gigabyte auf 52 Mrd. Gigabyte erhöht. Noch dynamischer entwickelte sich die Datenverkehrsmenge im Mobilfunk, wenngleich auf einem niedrigeren absoluten Niveau: Lag die Datenübertragung im Jahr 2012 noch bei insgesamt 156 Mio. Gigabyte, gehen Berechnungen der Bundesnetzagentur davon aus, dass dieser Wert Ende 2019 ca. 2.765 Mio. Gigabyte erreicht hat.

Der Status quo der Digitalisierung in Deutschland bildet lediglich eine Momentaufnahme ab. Es ist zu erwarten, dass sich Verbreitung und Nutzung digitaler Technologien in unterschiedlichen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft dynamisch entwickeln und neue Anwendungen, Nutzungsformen und Erfordernisse an Infrastrukturen und Regulierung hervorbringen. Fünf zentrale, eng miteinander in Verbindung stehende Trends lassen sich dabei identifizieren, die auch für Deutschland relevant sind:

- **Zunahme vernetzter Endgeräte und das Internet der Dinge**: Innerhalb der nächsten Dekade wird in Deutschland wie auch global davon ausgegangen, dass nicht nur die Zahl und Vielfalt von mit Mikroprozessortechnik ausgestatteten Geräten zunimmt, sondern auch deren Vernetzung untereinander und die Anbindung an das Internet. Im Bereich privater Nutzerinnen und Nutzer kommen zusätzlich zu Smartphones und Tablets vermehrt Wearables, wie etwa Smartwatches und Fitnesstracker und viele weitere, vernetzte Geräte im Heimbereich. Unter den Schlagwörtern „Industrie 4.0“ oder „Industrielles Internet der Dinge“ ist dieser Vernetzungstrend auch in der industriellen Produktion zu beobachten. Mit dem autonomen oder teilautonomen Fahren von

PKWs und LKWs entsteht im Mobilitätsbereich ein zentraler Anwendungsfall des Internets der Dinge – auch wenn es aller Voraussicht nach noch Jahrzehnte dauern wird, bis tatsächlich autonom fahrende Fahrzeuge großflächig zum Einsatz kommen.

- Zunehmende **Datafizierung und Datengenerierung**: Die sogenannte Datafizierung, also die Erzeugung von Daten in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen, und insbesondere die dabei anfallenden Metadaten bedeuten eine immense Zunahme an auswertbarer Information, was häufig mit dem Begriff „Big Data“ beschrieben wird. Mit komplexer Software können diese enormen Datensätze zunehmend besser zur Verfolgung spezifischer Ziele und Interessen erschlossen werden. Eine beachtliche Anzahl digitaler Geschäftsmodelle basieren inzwischen auf der Auswertung solcher großen Datenmengen und es wird davon ausgegangen, dass deren Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft weiter zunehmen wird.

- Zunehmender **Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI)**: Dank selbstlernender Softwaresysteme können zunehmend auch komplexere Aufgaben von Maschinen übernommen werden. Datafizierung und Künstliche Intelligenz sind dabei eng miteinander verbunden: Erst mit Techniken der KI und Datenwissenschaft wird es effektiv möglich, große Datenmengen auszuwerten. Insbesondere Fortschritte in der Forschung zum Maschinellen Lernen haben zu wesentlichen Verbesserungen in den Bereichen geführt, in denen die Techniken der klassischen symbolverarbeitenden KI relativ schlecht abschnitten, wie bei der Mustererkennung, Klassifikation, Spracherkennung, Schrifterkennung, Bild- und Gesichtserkennung und dem automatisierten Sprachübersetzen.

- Zunehmende **Virtualisierung**: Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) sind als Technologie inzwischen in der Kommerzialisierungsphase und werden sich stärker ausbreiten, im Unterhaltungs- und Spielebereich, aber zunehmend auch bei Fahrzeugen. Bei den künftigen Anwendungen ist eine bessere Raumerfassung zentral, da nur so virtuelle Inhalte räumlich eingeblendet werden können. Eine weitere Schlüsseltechnologie für AR und VR wird der neue Mobilfunkstandard 5G darstellen. Erst wenn die relativ aufwendigen 3D-Berechnungen mit geringer Verzögerung, d.h. mit kurzen Latenzzeiten, in der Cloud erledigt werden können, wird eine breite Anwendung und Adoption realistisch.

- **Steigende Rechen- und Speicherkapazität**: Die Trends der zunehmenden Anzahl und Vernetzung von Geräten, die damit verbundene wachsende Datenmenge und der Einsatz von KI sowie die Virtualisierung erfordern laufend mehr Speicher- und Rechenkapazitäten. Bereits heute zeigt sich der Bedarf nach einem massiven Ausbau der Übertragungsinfrastruktur, wie auch von Infrastrukturen im Bereich der Datenverarbeitung und -speicherung. Allein für Deutschland wird im Bereich des mobilen Datenverkehrs von jährlichen Wachstumsraten von 30 Prozent ausgegangen. In deutschen Großstädten beginnt zudem die Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G. Die Besonderheit von 5G ist die hohe erzielbare Datenrate und Latenzzeiten von wenigen Millisekunden bis unter eine Millisekunde, wodurch eine Datenkommunikation in nahezu Echtzeit ermöglicht wird. Mit der Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G werden neue, auch sicherheitsrelevante Anwendungen ermöglicht. Beispiele solcher Anwendungen sind das autonome Fahren, eine noch stärker vernetzte Produktion im Sinne Industrie 4.0, aber auch digitale Anwendungen für die Gesundheitsversorgung im ländlichen Raum. Mit Blick auf die wachsenden Datenströme und den steigenden Bedarf an Rechenkapazitäten zeichnet sich zudem ein neues Paradigma zur Bewältigung des Datenverkehrs ab, das sogenannte Edge Computing. Beim Edge Computing erfolgt die Datenverarbeitung nicht zentral in der Cloud, sondern dezentral in der Netzwerkperipherie. So hilft Edge Computing, die IT-Infrastruktur zu entlasten und gewährleistet die

für das Internet der Dinge so wichtigen schnellen Reaktionszeiten. Dabei ist Edge Computing als eine Erweiterung der bestehenden Netzarchitekturen zu verstehen, nicht als deren Ablösung.

Neben diesen fünf länger wirkenden Trends haben durch die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie digitale Technologien in Deutschland und in vielen Teilen der Welt einen erheblichen Bedeutungsschub erhalten. Dies zeigt sich beispielsweise im Anstieg an Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern, die ihrer Tätigkeit aus dem Homeoffice nachgehen. Zudem wurden Geschäftsreisen, Konferenzen und andere Veranstaltungen sowie in weiten Teilen auch der Schul- und Universitätsbetrieb in den digitalen Raum verlegt. Allerdings wurden im Zuge der Corona-Pandemie auch große Defizite offenkundig, beispielsweise in den digitalen Infrastrukturen und in der Geräteausstattung von Bildungseinrichtungen oder bei der Wahrnehmung von Verwaltungsaufgaben.

Seit einigen Jahren wird die hohe Bedeutung der Digitalisierung zum Umbau zentraler wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bereiche hin zu einer Klimaneutralität hervorgehoben. So werden digitale Technologien und Anwendungen, wie etwa Künstliche Intelligenz und das Internet der Dinge häufig als Enabler der Energie- und der Verkehrswende angesehen. Allerdings steht eine umfassende Untersuchung der durch die Digitalisierung realisierbaren THG-Minderungspotenziale für Deutschland noch aus. Ergebnisse einzelner Studien lassen zwar die Schlussfolgerung zu, dass die großen Hebel für Minderungspotenziale in der Industrieproduktion, im Gebäudesektor, im Transport- und im Energiesektor liegen. Die Bandbreite der berechneten Potenziale ist allerdings aufgrund methodischer Schwierigkeiten und unterschiedlich getroffener Annahmen groß. Offene Fragen sind hier die Festlegung des Referenzszenarios, wovon die Höhe der geschätzten Reduktionspotenziale abhängt, die Berücksichtigung gesamtwirtschaftlicher Systemzusammenhänge einschließlich Induktions- und Reboundeffekte sowie die Frage nach der Vollständigkeit und Repräsentativität der untersuchten digitalen Anwendungsfälle.

In der vorliegenden Studie wird der Ansatz verfolgt, für die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Gebäude und Industrie jeweils zwei Anwendungsbeispiele digitaler Technologien näher zu beleuchten, um – wo das möglich ist – das Potenzial zur Vermeidung von Treibhausgasen in Deutschland konkret aufzuzeigen. Bei der Auswahl der Technologien haben wir uns gleichermaßen an der Datenverfügbarkeit und der aktuellen Diskussion und Bedeutung innerhalb des jeweiligen Sektors orientiert:

- Im Energiesektor werden **Virtuelle Kraftwerke** (VK) zukünftig eine tragende Rolle einnehmen. Ein Virtuelles Kraftwerk ist ein Zusammenschluss von dezentralen Einheiten im Stromnetz, die über ein gemeinsames Leitsystem koordiniert werden. Die dezentralen Einheiten können Stromproduzenten, wie Biogas- Windkraft- oder Photovoltaikanlagen, Stromverbraucher oder Stromspeicher sein. Zweck des VK ist die gemeinsame Vermarktung von Strom und Flexibilität aus dem Schwarm der aggregierten Anlagen. So können sie einen wichtigen Beitrag zur Integration von fluktuierenden Erneuerbaren Energien in den Strommarkt und zur Stabilisierung der Stromnetze leisten. VK können Leistungsgrößenordnungen erreichen, um mit konventionellen Kraftwerken in den Wettbewerb zu treten. Ferner fördern sie die Integration kleiner dezentraler Anlagen, die so aktiv im Markt agieren. Außerdem sind VK in der Lage, Regelleistung und Regelenergie bereitzustellen und auch hier vorgehaltene fossile Energieerzeuger zu ersetzen.

- Mit **Flexibilitätsplattformen** können Engpässe im Stromnetz auf Verteilnetzebene, die durch veränderte Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen entstehen und u.a. zur Abregelung bei der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern führen, begegnet werden. Mit Flexibilität

wird die technische Fähigkeit einer Energieerzeugungsanlage oder eines Energieverbrauchers bezeichnet, ihre aktuelle oder prognostizierte Leistung zu verändern. Aktuell werden marktbasierte Konzepte entwickelt und erforscht, mit deren Hilfe mit lokaler Flexibilität auf lokale Stromnetzengpässe reagiert werden kann. Diskutiert werden u.a. Plattformkonzepte, hinter denen die Idee steht, dezentrale Flexibilität auf digitalen Plattformen (Flexibilitätsplattformen) markbasiert anzubieten, um damit lokal Netzengpässe zu verringern und die Abregelung der Einspeisung von Erneuerbare Energien Anlagen zu minimieren. Hierfür sind auf der Erzeugungs- und Nachfrageseite bestimmte technische Voraussetzungen erforderlich. Dazu gehören die Fähigkeit der Akteure, kurzfristig auf Preissignale zu reagieren, mit Sensorik und Aktorik ausgestattete Anlagen und Verteilnetze mit Echtzeitdatenauswertung. Aus den Angeboten marktbasierter netzdienlicher Flexibilitäten ergibt sich dann ein Beitrag zum Klimaschutz, wenn der nicht abgeregelte Strom aus erneuerbaren Energien oder KWK-Anlagen treibhausgasintensive Energieträger ersetzt. Das ist durch die Kopplung von Sektoren möglich, wenn z.B. zuschaltbare Lasten wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen, um eine Abregelung des erneuerbaren Stroms zu vermeiden.

- Auch im Verkehr wird Digitalisierung breit diskutiert und als ein Schlüsselfaktor zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele im Verkehrssektor angesehen. Neben Anwendungen digitaler Lösungen, die unmittelbar den Verkehrsfluss oder das Verkehrsverhalten adressieren, ergeben sich aus der digitalen Durchdringung des Alltags ebenfalls Treibhausgaseinsparpotenziale. Viel diskutiert wird dabei der Bereich der **Telearbeit beziehungsweise mobilen Arbeit**. Durch eine mögliche Verlagerung der Arbeit nach Hause mit Hilfe von IKT können tägliche Arbeitswege reduziert und verkehrsspezifische Treibhausgasemissionen eingespart werden. Eine Digitalisierung der Arbeitswelt könnte somit das individuelle Mobilitätsverhalten beeinflussen und die Verkehrsleistung, die zurückgelegten Kilometer pro Person und Tag langfristig reduzieren. Besonders relevant in der Diskussion sind dabei Berufsgruppen, bei denen ein hoher Einsatz von IKT flächendeckend möglich und bereits etabliert ist. Die berufliche Mobilität, das heißt der tägliche zurückgelegte Weg von und zur Arbeit als auch Wege aus dienstlichen Zwecken, machen in Deutschland einen Großteil des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr aus. Die berufsbedingte Mobilität trägt wesentlich zur Klimabilanz des Personenverkehrs und des Verkehrssektors im Allgemeinen bei. Insbesondere wenn Arbeitnehmende, die mit dem eigenen Pkw zur Arbeit fahren, vermehrt im Homeoffice arbeiten würden, könnte eine Hauptquelle für Emissionen im Berufsverkehr adressiert werden. Um die Einsparpotenziale gesamtheitlich abzuschätzen, müssen in Bezug auf mobile Arbeit über eingesparte Emissionen aus dem Verkehr auch gegenläufige Effekte mit in Betracht genommen werden, wie z.B. der Energieverbrauch für IKT, Wärme und Beleuchtung am heimischen Arbeitsplatz. Selbst bei einem hohen Homeoffice-Anteil würden Büroflächen kurz- und mittelfristig weiterhin Bestand haben und besetzt sein. Eine hier durchgeführte exemplarische Quantifizierung der möglichen Potenziale und gegenläufiger Effekte verdeutlicht, dass mobiles Arbeiten und Arbeiten im Homeoffice nicht a priori aus Klimagesichtspunkten vorteilhaft ist. Die konkrete Ausgestaltung und Nutzung sowie die Art des substituierten Verkehrsmittels haben einen großen Einfluss darauf, ob und in welchem Umfang tatsächlich THG-Emissionen vermindert werden.

- Das sogenannte (Truck-) **Platooning** im Güterverkehr beschreibt die elektronische Vernetzung mehrerer Lkws, die in Echtzeit miteinander kommunizieren. Einzelne Trucks schließen sich dabei zu einer eng gestaffelten Kolonne zusammen. Durch den Zusammenschluss agiert die gesamte Lkw-Flotte wie ein Fahrzeug (Platoon), da die Fahrweise des Führungsfahrzeugs auf die Nachfolgenden übertragen wird, das heißt Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Bremsmanöver.

Insbesondere aus der Reduzierung der Abstände ergeben sich Vorteile im Klimaschutz. Durch die verbesserte Aerodynamik können die Lkws im Windschatten voneinander fahren und so den Luftwiderstand verringern. Dadurch reduziert sich der Kraftstoffverbrauch und die Energieeffizienz wird optimiert. Die Kommunikation der vernetzten Lkw-Flotte basiert auf der Vehicle-to-Vehicle (V2V) Kommunikation, bei dem die Fahrzeuge untereinander über automobiles WLAN (ITS-G5) Daten austauschen. Für eine breite Umsetzung von Platooning in Deutschland braucht es jedoch eine sichere und flächendeckende Datenübertragung und auch die Frage nach „grüner IT" muss hinreichend gestellt werden, da aufgrund der hohen Datenrate vernetzter Systeme ebenfalls Emissionen anfallen. Daneben würde auch eine Novellierung der Straßenverkehrsordnung erforderlich sein, die geringere Abstände zwischen den Lkws zulässt und damit Platooning in Deutschland rechtlich ermöglicht. Für eine sichere Umsetzung bedarf es allerdings auch einen hohen Vernetzungsanteil anderer Verkehrsteilnehmer und damit auch ein anderes Bewusstsein und Akzeptanz gegenüber vernetzten teil- sowie vollautonomen Systemen.

- Digitale Technologien können bei der **Transformation des Gebäudesektors** sowohl in der Phase der Nutzung der Gebäude als auch beim Bau sowie der Sanierung eine Rolle spielen. In der Nutzungsphase können digitale Technologien zu einer Reduktion des Wärmeenergieverbrauchs beitragen, indem die Transparenz von Energieverbräuchen gesteigert wird und/oder Technologien zur Regelung und Steuerung von Heizungs- und Lüftungsanlagen zum Einsatz kommen. Beim Neubau und in der Sanierung können durch digitale Technologien Kosten gesenkt und damit höhere Sanierungsraten und -tiefen erzielt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Konzept der **seriellen Sanierung**, bei dem die energetische Modernisierung von Gebäuden durch eine Vereinheitlichung von Prozessen in Planung, Produktion und Umsetzung sowie den Einsatz von moderner Digitaltechnologie und serieller Fertigungstechnik schneller, kostengünstiger und mit weniger Arbeitsaufwand vor Ort erfolgt. Die Nutzung von digitalen Technologien für die serielle Sanierung mit industriell vorgefertigten Bauteilen kann potenziell einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der energetischen Sanierungsrate und -tiefe liefern und somit mittel- bis langfristig deutliche Minderungen der CO_2-Emissionen erzielen.

- Im Bereich der Smart Home Systeme bietet die Nutzung digitaler Technologien zur automatischen **Steuerung und Regelung von Heizungstechnologien** erhebliche kurzfristig realisierbare Energieeinsparpotenziale. Wird beispielsweise eine zusätzliche Durchdringung der Technologien in 15 Prozent des Gebäudebestands sowie eine dadurch erreichbare durchschnittliche Energieverbrauchsreduktion in diesen Gebäuden um 6 Prozent angenommen, könnten insgesamt jährlich ca. 1 Mio. Tonnen CO_2 eingespart werden.

- Die Umgestaltung des Strom- und Wärmemarktes auf erneuerbare Energien erfordert neben der geänderten Bereitstellung der Energie auch eine flexibilisierte Nutzung, die in einer gewissen Bandbreite auf das fluktuierende Angebot an Erneuerbare Energie im Markt reagieren kann. Ziel des Angebots an Flexibilität ist eine verbesserte Einbindung der erneuerbaren Stromerzeugung, um die energiebedingten CO_2-Emissionen aus der konventionellen Energiebereitstellung zu senken. Der **Industriesektor, insbesondere auch die Chemische Industrie**, ist hier eine sehr relevante Größe. Durch gezielte Anpassung und Steuerung der Stromnachfrage – das sogenannte **Demand Side Management (DSM)** – kann der Chemiesektor einen wichtigen Flexibilitätsbeitrag bei entsprechenden netzseitigen Anreizen leisten. Flexibilitätsoptionen, die sich hier als vielversprechend erweisen, sind die Hybridisierung der Wärmeerzeugung, der Einsatz von thermischen Speichern sowie die Nutzung synthetischer Brenngase (wie z.B. grüner Wasserstoff). Die Hybridisierung der industriellen Wärmeerzeugung – die Möglichkeit Wärme zum einen mit

elektrischen Verfahren, zum anderen über Brennstoffe bereitzustellen – kann einen signifikanten Beitrag zur Flexibilisierung der Stromnachfrage liefern. Ein routinemäßiger Wechsel zwischen strom- und gasbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen bedeutet allerdings eine Herausforderung, da aufgrund unterschiedlicher Wirkungsgrade und Wärmeeintragsorte der Verfahren ein Abgleich des Wärmeübertrags kompliziert ist. Hier könnten digitale Expertensysteme dazu beitragen, einen flexiblen hybriden Betrieb zu automatisieren. Darüber hinaus können elektrisch beheizte thermische Speicher durch eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung und -nutzung Flexibilität bereitstellen. Die größten Potenziale bestehen u. a. in der Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie. Zu den synthetischen Brenngasen zählen elektrolytisch erzeugter Wasserstoff und synthetisches Methan. Die Nutzung solcher erneuerbaren Gase kann einen Beitrag zur Defossilisierung der Grundstoffindustrie leisten und hätte den Vorteil, dass die bestehenden Prozesse mit relativ geringen Änderungen weiter betrieben werden könnten. Wenn diese synthetischen Brenngase über Elektrolyse erzeugt werden, so stellt diese in Kombination mit einem Wasserstoffspeicher ebenfalls ein Flexibilitätspotenzial am Strommarkt dar.

- Eine vernetzte und stark automatisierte Produktion im Sinne des Konzepts **Industrie 4.0** (**Smart Manufacturing**) bietet die Möglichkeit, durch effizientere Prozesse und durch die Vermeidung und Verringerung von Verarbeitungsverlusten indirekt zum Klimaschutz beizutragen. Die dabei eingesetzten digitalen Technologien umfassen die Erfassung von Maschinen- und Prozessdaten in der Produktion in Echtzeit, die Nutzung digitaler Systeme in der ganzen Wertschöpfungskette und den Einsatz digitaler Technologien zur Prozessverbesserung, zum Maschinen- und Anlagenmanagement und zur Mitarbeiterunterstützung. Digitale Technologien im Rahmen eines Smart Manufacturings können zu einer deutlichen Einsparung von Treibhausgasemissionen führen. Im Rahmen von Fallstudien des VDI Zentrums Ressourceneffizienz wurden für einzelne Produktionsprozesse Einsparpotenziale von bis zu 25 Prozent aufgezeigt. Eine Hochrechnung auf die gesamten Einsparpotenziale in der deutschen Industrie ist nicht möglich, dazu sind die einzelnen Prozesse zu unterschiedlich und es ist unklar, wie groß die Potenziale einzelner Prozessoptimierungen bezogen auf die gesamte deutsche Industrie sind.

Eine ganzheitlich angelegte Bewertung des Einsatzes digitaler Technologien für den Klimaschutz muss auch den **Energie- und Ressourcenverbrauch** durch Herstellung und Anwendung der dafür erforderlichen digitalen Endgeräte und Infrastrukturen mit betrachten. Vergleichbar mit Literaturangaben zu den Einsparpotenzialen digitaler Technologien weisen auch die Angaben zum Energie- und Ressourcenverbrauch sowie den THG-Emissionen der IKT große Bandbreiten auf. Zusammenfassend liegen auf der Grundlage der Querschnittsauswertung vorliegender Studien für das Jahr 2020 die THG-Emissionen der IKT weltweit zwischen etwa 700 Mio. Tonnen CO_2e und 2.000 Mio. Tonnen CO_2e, was einem Anteil von zwischen etwa 1,5 und 4 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen entspricht, wobei eine Bandbreite von 1,8 bis 3,2 Prozent als wahrscheinlich eingeschätzt wird (Bieser et al. 2020). Die Bandbreiten in den Angaben beruhen teilweise allein schon darauf, ob nur die Nutzungsphase oder zusätzlich auch die Herstellung digitaler Technologien einbezogen wird, und ob auch Geräte der Unterhaltungselektronik mit einbezogen werden. Im Rahmen dieser Studie wurden auch die THG-Emissionen durch die Digitalisierung in Deutschland näherungsweise abgeschätzt. Demnach belaufen sich die jährlichen THG-Emissionen in Deutschland durch die Digitalisierung auf rund 34 Mio. Tonnen CO_2e in 2020 (inklusive Emissionen aus der IKT-Nutzung sowie der Herstellung der Endgeräte, einschließlich Unterhaltungselektronik und der digitalen Infrastruktur), dies entspricht rein rechnerisch einem Anteil an den gesamten deutschen THG-Emissionen von gut 4 Prozent. Mit Blick auf die herangezogenen Ausgangsdaten gibt es Hinweise, dass diese Abschätzung die tatsächlichen THG-Emissionen eher unter- als überbewertet.

THG-Emissionen können einerseits mit durchschnittlichen Daten zum Bestand und zur Nutzung von Geräten und Infrastruktur und dem damit verbundenen Strombedarf abgeschätzt werden. Ein anderer Weg wird mit sogenannten CO_2-Rechnern begangen; bei diesen sind in der Regel keine Durchschnittsdaten, sondern individuelle Annahmen oder Angaben zum Bestand und den Nutzungsgewohnheiten Ausgangspunkt für die Berechnung der daraus resultierenden Umwelteffekte, einschließlich des dann individuellen **CO_2-Fußabdrucks**. Aktuelle Ergebnisse zeigen bei einer angenommenen durchschnittlichen privaten Nutzung von digitalen Geräten und Dienstleistungen einen Footprint von rund 740 kg CO_2e pro Jahr und Person, bei intensiver Nutzung steigt dieser Wert auf rund 1.050 kg CO_2e pro Jahr an. Setzt man diese Ergebnisse in Bezug auf die jährlichen Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland von rund 11 t CO_2e, ergeben sich Anteile zwischen 6,7 und 9,5 Prozent. Mit Blick auf die ambitionierten Klimaschutzziele sind diese Anteile problematisch, da diese nach den bisherigen Prognosen bestenfalls stagnieren, bedingt durch eine zunehmende Ausstattung an IKT-Geräten und intensiverer Nutzung eher aber noch ansteigen. Bei beiden Nutzungsprofilen zeigt sich, dass der THG-Ausstoß bei der Herstellung der IKT-Geräte keineswegs vernachlässigbar ist. Sein Anteil liegt zwischen 50 und 60 Prozent des digitalen CO_2-Fußabdrucks.

Selbst wenn die vorgerechneten Zahlen nur eine Schätzung darstellen, so zeigen sie jedoch allein auf Grund ihrer Größenordnung, dass sowohl bei den Endgeräten als auch in den Datennetzwerken und den Rechenzentren noch erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, Treibhausgasemissionen zu senken. Nur so kann die Digitalisierung nachhaltig gestaltet werden. Wichtige Ansatzpunkte zur Erschließung von Minderungspotenzialen sind die Steigerung der Energieeffizienz von IKT-Endgeräten und Rechenzentren, die Verlängerung der Nutzungsdauer von IKT-Geräten, die Entwicklung effizienter Software sowie der Einsatz von Erneuerbaren Energien für die Stromversorgung von IKT-Infrastruktur.

Weitere in dieser Studie durchgeführte Fallbeispiele zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks zeigen, dass unter Heranziehung von Basisdaten für häufig eingesetzte IKT-Endgeräte und IKT-Dienstleistungen die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks durchaus leistbar ist. Die Schwierigkeiten liegen eher bei der Interpretation, Einordnung und ggf. Hochrechnung von Ergebnissen zu möglichen THG-Gesamtminderungspotenzialen durch die Anwendung digitaler Technologien. Dies kann an drei Beispielen wie folgt verdeutlicht werden:

- Die Übertragung von Videos über das Internet ist derzeit ein wichtiger Treiber für den wachsenden Datenverkehr. Videostreaming ist eine digitale Dienstleistung, die es ermöglicht, aus einem großen Angebot an Filmen zeitunabhängig und sofort, „on demand“ Medien zu konsumieren. Damit wird ein medialer Konsum ermöglicht, den es verglichen mit dem linearen Fernsehen oder dem Ausleihen von Filmen aus Videotheken so vorher nicht gab. Videostreaming ist eine digitale Technologie, die kein bestehendes Konsummodell substituiert, sondern neue Konsummöglichkeiten ermöglicht – mit dem Preis, zusätzlicher THG-Emissionen.

- Bei mobilem Arbeiten/Home-Office kommt es sehr stark auf die Ausgestaltung an, ob tatsächlich gegenüber der Präsenzarbeit im Büro in signifikantem Umfang THG-Emissionen eingespart werden können. Insbesondere solange parallele Strukturen aufrechterhalten und entsprechende Geräteausstattungen bereitgestellt werden und nicht in nennenswerten Umfang Arbeitswege mit dem Pkw eingespart werden, sind die erreichbaren THG-Emissionsminderungspotenziale gering.

- Demgegenüber können Videokonferenzen, die zur Vermeidung von langen Dienst-/Geschäftsreisen beitragen, in erheblichem Umfang zur Einsparung von THG-Emissionen beitragen; dies

auch unter der hier unterstellten Situation, dass in virtuellen Konferenzen Videos in hoher Auflösung übermittelt werden.

Vergleichbar zu Ergebnissen aus der aktuellen Literatur deuten die hier durchgeführten Berechnungen und Abschätzungen auch auf grundlegende Probleme hin, die mit der Identifikation und dem Vergleich von THG-Reduktionspotenzialen digitaler Anwendungen verbunden sind. So hängen die Reduktionspotenziale wesentlich davon ab, was jeweils als Referenz bzw. „business as usual“ angesehen wird. Zudem muss sichergestellt werden, dass nicht nur Anwendungsfälle mit potenziell hohen Reduktionspotenzialen, sondern auch Anwendungsfälle mit Potenzial zur Erhöhung der THG-Emissionen betrachtet werden. Schließlich müssen für eine richtungssichere Bewertung der digitalen Anwendungen auch die gesamtwirtschaftlichen Systemzusammenhänge angemessen mit betrachtet werden. Vor diesem Hintergrund sind neben einer noch verstärkten Begleitforschung auch Anstrengungen erforderlich, allgemein anerkannte Basisdaten für zentrale IKT-Produkte und -Dienstleistungen bereitzustellen (zum Beispiel Key Performance Indikatoren für Rechenzentren oder die CO_2-Intensität bei der Nutzung von digitalen Dienstleistungen wie Videostreaming) und eine Verständigung auf grundlegende Bilanzierungsregeln für digitale Anwendungstechnologien herbeizuführen.

Die in der Studie vorgenommene Auswertung der Entwicklung zum Energiebedarf und den damit verbundenen THG-Emissionen aus der Nutzung von IKT-Endgeräten, Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen in Deutschland und die drei konkreten Fallbeispiele mit Berechnung des CO_2-Fußabdrucks verdeutlichen die Ambivalenz der gegenwärtigen Entwicklung. Zwar bieten digitale Technologien in vielen Sektoren Chancen, ambitionierte Klimaziele zu erreichen. Diesen Chancen stehen jedoch erhebliche Risiken gegenüber, bedingt durch den wachsenden Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Diese Risiken ergeben sich aus den hier untersuchten direkten Effekten durch Herstellung und Nutzung von IKT-Endgeräten und der IKT-Infrastruktur, aber auch durch indirekte Auswirkungen infolge von Rebound- und Induktionseffekten. Sowohl zur Wahrnehmung der Chancen als auch zur Eindämmung der Risiken braucht es daher eine effektive und kohärente politische Steuerung.

Eine klimaschutzspezifische Digitalpolitik kann und sollte dabei ein entsprechend breites Spektrum regulatorischer Handlungsmöglichkeiten ausschöpfen. Die in der Studie durchgeführte Analyse zeigt, dass die Umweltpolitik dies erkannt hat und auf diverse Instrumente setzt: So werden sowohl Instrumente einer indirekten (Anreiz-)Steuerung, wie die Förderung vielversprechender Technologien oder eine „grüne“ Beschaffung, als auch direkte, ordnungsrechtliche Instrumente der Verhaltenssteuerung, wie Ökodesign-Standards für Endgeräte und digitale Infrastrukturen entwickelt und umgesetzt. Die Politik setzt aber auch auf öffentlich finanzierte Forschung und übergeordnete Strategien, wie die Schaffung spezifischer Datenräume und Datenstrategien, um umweltpolitischen Akteuren die technologischen, ökonomischen und informatorischen Mittel zur Entwicklung innovativer Lösungen an die Hand zu geben. Eine besondere Herausforderung bei der Konzeption und Anpassung staatlicher Steuerungsinstrumente besteht darin, mit der Innovationsdynamik der digitalen Technologien und Geschäftsmodelle Schritt halten zu können.

Summary

Background and Objective

Digitalisation is already strongly shaping the way we live, communicate, work, do business and consume, and is therefore also seen as the trigger of a change or transformation process. This is not an exclusively technological and economic process, but one that affects all aspects of society. The main developments shaping this change are:

- The use of digital devices and data in all areas of life and work, driven in particular by the increase in mobile devices and their infrastructure,
- the global interconnection of distributed devices and users, enabling the digitalisation of production and trade processes (networked machines, trade controlled by algorithms),
- the strong growth of data volumes and data transmission and the outsourcing of data processing from individual devices to central data centres (cloud computing, cloud storage),
- the high and increasing economic importance of structured data from the usage process as a production factor and data as a component of services, and
- the expansion of the so-called human-machine interface (for example through voice control) and the development of learning, self-programming systems up to artificial intelligence.

According to the amendment to the Federal Climate Protection Act, greenhouse gas emissions in Germany are to be reduced by at least 65 percent by 2030 compared to 1990, and Germany is to become climate neutral by 2045. In the discussion about the necessary climate-neutral transformation of central economic and social sectors, such as industry, energy supply, transport, agriculture and housing, the potential of digitalisation is often highlighted. Digital technologies and applications, such as artificial intelligence and the Internet of Things (IoT), the argument goes, can make an important contribution to conserving natural resources, avoiding greenhouse gases and implementing sustainable production and consumption methods. However, the impact of digitalisation on climate change is highly ambivalent. In 2020, between 1.8 and 3.2 percent of global greenhouse gas emissions were directly attributable to information and communication technologies. Against this background, this study aims to analyse the interactions between digitalisation and climate protection. Specifically, the study aims to provide answers to the following questions:

- What is the state of digitisation in Germany? What are the most important developments and trends?
- What concrete opportunities and starting points does digitalisation offer for achieving ambitious climate protection targets in Germany?
- What energy consumption is associated with digitalisation in Germany? What are the greenhouse gas emissions from digitalisation? What are the main drivers and where are the potentials for reduction?
- Which political instruments are necessary for a climate-neutral orientation of digitalisation?

The present study is based on an evaluation of the literature and statistical data; the scientific work carried out did not include any data collection of its own.

Results

Germany ranks twelfth out of 28 countries in the European Union's Digital Economy and Society Index (DESI), just above the European average. The good basic digital skills and software competencies of the population, as well as the active use of the internet by private individuals, have a particularly positive effect on the rating. In terms of connectivity, Germany scores very well on readiness for the new 5G mobile standard, broadband prices, and general fixed-line broadband usage. However, the country continues to rank below the European average in terms of coverage with very high capacity networks, and the low level of digitalisation of public services and the relatively weak penetration and use of digital technologies in the German economy have a negative impact on Germany's ranking in the DESI. Infrastructures for data transmission, storage and processing are the backbone of digitalisation in Germany and are becoming increasingly important with the spread of digital applications and the associated increase in data volumes. Between 2012 and 2019 alone, annual data transmission via broadband connections in the landline network has increased from 7 billion gigabytes to 52 billion gigabytes, according to analyses and calculations by the Federal Network Agency. Data traffic volumes in mobile communications developed even more dynamically, albeit at a lower absolute level: While data transmission in 2012 totalled 156 million gigabytes, calculations by the German Federal Network Agency assume that this figure will have reached approximately 2,765 million gigabytes by the end of 2019.

The status quo of digitalisation in Germany is only a snapshot. It is to be expected that the dissemination and use of digital technologies in different areas of the economy and society will develop dynamically and produce new applications, forms of use and requirements for infrastructures and regulation. Five central, closely related trends can be identified that are also relevant for Germany:

- **Increase in networked end devices and the Internet of Things**: Within the next decade, it is assumed in Germany as well as globally that not only the number and variety of devices equipped with microprocessor technology will increase, but also their networking with each other and their connection to the internet. In the area of private users, in addition to smartphones and tablets, there will be an increase in wearables, such as smartwatches and fitness trackers and many other networked devices at home. Under the catchwords "Industry 4.0" or "Industrial Internet of Things", this networking trend can also be observed in industrial production. With the autonomous or semi-autonomous driving of cars and trucks, a central application of the Internet of Things is emerging in the mobility sector – even though it will probably be decades before autonomous vehicles are actually used on a large scale.

- Increasing **datafication and data generation**: The datafication, i.e. the generation of data in a multitude of application areas, and especially the generated metadata, mean an immense increase in analysable information, which is often described with the term "big data". With complex software, these enormous data sets can be increasingly better tapped to pursue specific goals and interests. A considerable number of digital business models are now based on the evaluation of such large amounts of data and it is assumed that their importance for the economy and society will continue to increase.

- Increasing **use of artificial intelligence (AI)**: Thanks to self-learning software systems, more and more complex tasks can be taken over by machines. Datafication and artificial intelligence are closely linked: Only with AI and data science techniques, it is possible to effectively analyse large amounts of data. In particular, advances in machine learning research have led to significant

improvements in areas where the techniques of classical symbol-processing AI performed relatively poorly, such as pattern recognition, classification, speech recognition, character recognition, image and face recognition and automated language translation.

- Increasing **virtualisation**: Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) are now in the commercialisation phase as a technology and will become more widespread, in entertainment and gaming, but increasingly also in vehicles. In future applications, better spatial awareness is central, as this is the only way to spatially overlay virtual content. Another key technology for AR and VR will be the new mobile phone standard 5G. Only when the relatively complex 3D calculations can be done in the cloud with little delay, i.e. with short latency times, widespread application and adoption will become realistic.

- **Increasing computing and storage capacity**: The trends of increasing numbers and networking of devices, the associated growing amount of data and the use of AI as well as virtualisation constantly require more storage and computing capacities. The need for a massive expansion of the transmission infrastructure, as well as infrastructures around data processing and storage, is already evident today. For Germany alone, annual growth rates of 30 percent are assumed in mobile data traffic. In addition, the introduction of the new mobile communications standard 5G is beginning in major German cities. The special feature of 5G is the high achievable data rate and short latency time of a few milliseconds to less than one millisecond, which enables data communication in almost real time. The introduction of the new mobile communications standard 5G will enable new applications, including those relevant to safety. Examples of such applications are autonomous driving, an even more networked production in the sense of Industry 4.0, but also digital applications for healthcare in rural areas. In view of the growing data streams and the increasing demand for computing capacities, a new paradigm for managing data traffic is also emerging, known as edge computing. In edge computing, data processing is not carried out centrally in the cloud but decentralised in the network periphery. In this way, edge computing helps to relieve the IT infrastructure and ensures the fast reaction times that are important for the Internet of Things. Edge computing is to be understood as an extension of the existing network architectures, not as their replacement.

In addition to these five longer-acting trends, the measures taken to contain the Corona pandemic have given digital technologies a significant boost in importance in Germany and in many parts of the world. This is reflected, for example, in the increasing number of employees pursuing their work from home offices. In addition, business trips, conferences, and other events, as well as school and university activities to a large extent, have been moved into the digital space. However, the Corona pandemic also revealed major deficits, for example in the digital infrastructures and equipment of educational institutions or in the performance of administrative tasks.

For some years now, the high significance of digitalisation for the transformation of central economic and social areas towards climate neutrality has been emphasised. Digital technologies and applications, such as artificial intelligence and the Internet of Things, are often seen as enablers of the transformations towards sustainability. However, a comprehensive study of the GHG reduction potentials that can be realised through digitalisation for Germany is still pending. Results of individual studies allow the conclusion that the major levers for reduction potentials lie in the industrial production, building sector, transport sector and in the energy sector. However, the range of calculated potentials is wide due to methodological difficulties and different assumptions made. Open questions here are the definition of the reference scenario, on which the amount of the estimated reduction potential depends, the consideration of macroeconomic system interrelationships including

induction and rebound effects, and the question of the completeness and representativeness of the digital use cases examined.

The approach taken in this study is to take a closer look at two examples of the application of digital technologies in each of the sectors of energy, transport, buildings and industry, in order to show – where possible – the potential for avoiding greenhouse gases in Germany in concrete terms. In selecting the technologies, we were equally guided by the availability of data and the current discussion and significance within the respective sector:

- In the energy sector, **virtual power plants** (VPPs) will play a leading role in the future. A virtual power plant is an association of decentralised units in the electricity grid that are coordinated via a common control system. The decentralised units can be electricity producers, such as biogas, wind power or photovoltaic plants, electricity consumers or electricity storage facilities. The purpose of the VPP is the joint marketing of electricity and flexibility from the swarm of aggregated plants. In this way, they can make an important contribution to the integration of fluctuating renewable energies into the electricity market and to the stabilisation of the electricity grids. VPPs can reach power scales that compete with conventional power plants. Furthermore, they promote the integration of small decentralised plants, which thereby actively operate in the market. Moreover, VPPs are able to provide operating reserve and control energy and also to replace fossil energy generators that are held in reserve here.

- **Flexibility platforms** can be used to counteract bottlenecks in the electricity grid at distribution grid level that arise due to changes in generation and consumption structures and lead, among other things, to curtailment in the feed-in of electricity from renewable energy sources. Flexibility refers to the technical ability of an energy generation plant or an energy consumer to change its current or forecast output. Currently, market-based concepts are being developed and researched with the help of which local flexibility can be used to react to local electricity grid bottlenecks. Among other things, platform concepts are being discussed, which are based on the idea of offering decentralised flexibility on digital platforms (flexibility platforms) in order to reduce local grid bottlenecks and minimise the reduction of feed-in from renewable energy plants. This requires certain technical prerequisites on the generation and demand side. These include the ability of the actors to react to price signals at short notice, plants equipped with sensors and actuators, and distribution grids with real-time data evaluation. Market-based grid-serving flexibilities can contribute to climate protection if the unregulated electricity from renewable energies or CHP (combined heat and power) plants replaces greenhouse gas-intensive energy sources. This is possible through the coupling of sectors when, for example, switchable loads such as heat pumps or electric vehicles are used to avoid curtailment of renewable electricity.

- Digitalisation is also widely discussed in transport and is seen as a key factor in achieving the sustainability goals in the transport sector. In addition to applications of digital solutions that directly address traffic flow or traffic behaviour, the digital penetration of everyday life also results in greenhouse gas savings potential. The area of **teleworking or mobile work is** the subject of much discussion. By possibly shifting work to the home with the help of ICT, daily commutes can be reduced, and transport-specific greenhouse gas emissions can be saved. Digitalisation of the working world could thus influence individual mobility behaviour and reduce transport performance and the number of kilometres travelled per person and day in the long term. Particularly relevant in the discussion are occupational groups in which a high level of ICT use is possible and already established. Occupational mobility, i.e. the daily distance travelled to and from work, as well as journeys for business purposes, account for a large part of the volume of passenger transport in

Germany. Work-related mobility contributes significantly to the carbon footprint of passenger transport and the transport sector in general. If employees who travel to work in their own cars were to work more in their home offices, a major source of emissions in commuter traffic could be addressed. To estimate the overall savings potential, counteracting effects, such as energy consumption for ICT, heat and lighting at the home workplace, must also be considered in relation to mobile work via saved emissions from transport. Even with a high proportion of home offices, office space would continue to exist and be occupied in the short and medium term. An exemplary quantification of the possible potentials and opposing effects carried out here makes it clear that mobile working and working in a home office is not a priori advantageous from a climate point of view. The concrete design and use as well as the type of substituted means of transport have a major influence on whether and to what extent GHG emissions are actually reduced.

- So-called (truck) **platooning** in freight transport describes the electronic networking of several trucks that communicate with each other in real time. Individual trucks join to form a closely staggered convoy. The entire truck fleet acts as one vehicle (platoon) because the driving style of the lead vehicle is transferred to the following trucks, i.e. speed, acceleration, and braking manoeuvres. In particular, the reduction of distances results in climate protection advantages. Due to the improved aerodynamics, the trucks can drive in the slipstream of each other and thus reduce air resistance. This reduces fuel consumption and optimises energy efficiency. The communication of the networked truck fleet is based on vehicle-to-vehicle (V2V) communication, in which the vehicles exchange data with each other via automotive WLAN (ITS-G5). However, for a broad implementation of platooning in Germany, secure and nationwide data transmission is needed and the question of "green IT" must also be adequately addressed, as emissions are also produced due to the high data rate of networked systems. In addition, an amendment to the road traffic regulations would also be necessary, which would allow smaller distances between trucks and thus make platooning legally possible in Germany. However, safe implementation also requires a high level of networking among other road users and thus a different awareness and acceptance of networked semi-autonomous and fully autonomous systems.

- Digital technologies can play a role in the **transformation of the building sector** both in the phase of building use and in the construction and refurbishment phases. In the use phase, digital technologies can contribute to a reduction in thermal energy consumption by increasing the transparency of energy consumption and/or using technologies to regulate and control heating and ventilation systems. In new construction and renovation, digital technologies can reduce costs and thus achieve higher renovation rates and depths. One example of this is the concept of **serial refurbishment**, in which the energy modernisation of buildings is carried out faster, more cost-effectively and with less work on site by standardising processes in planning, production and implementation and using modern digital technology and serial production technology. The use of digital technologies for serial refurbishment with industrially prefabricated components can potentially make an important contribution to increasing the rate and depth of energy refurbishment and thus achieve significant reductions in CO_2 emission in the medium to long term.

- In the area of smart home systems, the use of digital technologies for the automatic **control and regulation of heating technologies** offers considerable energy saving potential that can be realised in the short term. If, for example, an additional penetration of the technologies in 15 per cent of the building stock is assumed, as well as an achievable average energy consumption reduction in these buildings of 6 per cent, a total of approx. 1 million tonnes of CO_2 could be saved annually.

- The transformation of the electricity and heat market to renewable energy requires not only a change in the supply of energy, but also a more flexible use that can react within a certain range to the fluctuating supply of renewable energy in the market. The aim of supplying flexibility is to improve the integration of renewable electricity generation to reduce the energy-related CO_2 emission from conventional energy supply. The **industrial sector, especially the chemical industry,** is a very relevant factor here. Through targeted adjustment and control of electricity demand – so-called **demand side management (DSM)** – the chemical sector can make an important contribution to flexibility with the appropriate grid-side incentives. Flexibility options that prove promising here are the hybridisation of heat generation, the use of thermal storage and the use of synthetic fuel gases (such as green hydrogen). The hybridisation of industrial heat generation – the possibility of providing heat with electrical processes on the one hand and on the other hand via fuels – can make a significant contribution to making electricity demand more flexible. However, routinely switching between electricity- and gas-fired heat generation plants is a challenge, as the different efficiencies and heat input locations of the processes make it complicated to match the heat transfer. Here, digital expert systems could help to automate flexible hybrid operation. In addition, electrically heated thermal storage units can provide flexibility by decoupling heat generation and use over time. The greatest potentials exist, among other things, in the provision of process steam in the chemical industry. Synthetic fuel gases include electrolytically produced hydrogen and synthetic methane. The use of such renewable gases can contribute to the de-fossilisation of the basic materials industry and would have the advantage that existing processes could continue to be operated with relatively little change. If these synthetic fuel gases are produced via electrolysis, this also represents a flexibility potential on the electricity market in combination with a hydrogen storage facility.

- Networked and highly automated production in the sense of the **Industry 4.0** concept (**smart manufacturing**) offers the opportunity to contribute indirectly to climate protection through more efficient processes and by avoiding and reducing processing losses. The digital technologies used in this context include the collection of machine and process data in production in real time, the use of digital systems throughout the value chain and the use of digital technologies for process improvement, machine and plant management and employee support. Digital technologies in the context of smart manufacturing can lead to significant savings in greenhouse gas emissions. Case studies conducted by the VDI Resource Efficiency Centre have shown potential savings of up to 25 percent for individual production processes. It is not possible to extrapolate the total savings potential in German industry, as the individual processes are too different, and it is unclear how great the potential of individual process optimisations is in relation to German industry as a whole.

A holistic assessment of the use of digital technologies for climate protection must also consider the **energy and resource consumption** caused by the production and use of the digital devices and infrastructures required for this purpose. Comparable to literature data on the savings potential of digital technologies, the data on energy and resource consumption as well as the GHG emissions of ICT also show a wide range. In summary, based on the cross-sectional evaluation of available studies, the GHG emissions of ICT worldwide for the year 2020 range between about 700 million tons of CO_2e and 2,000 million tons of CO_2e, which corresponds to a share between 1.5 and 4 per cent of global greenhouse gas emissions, with a range of 1.8 to 3.2 per cent estimated as probable. (Bieser et al. 2020) . The ranges in the figures are partly based on whether only the use phase is included or also the production of digital technologies, and whether consumer electronics devices are also included. Within the scope of this study, the GHG emissions from digitalisation in Germany were also estimated approximately. According to this, the annual GHG emissions in Germany from

digitisation amount to around 34 million tonnes of CO_2 in 2020 (including emissions from ICT use and the manufacture of end devices, including consumer electronics and the digital infrastructure), which corresponds to a purely mathematical share of total German GHG emissions of approximately 4 percent. In reference to the used base data, there are indications that this estimate underestimates rather than overestimates the actual GHG emissions.

On the one hand, GHG emissions can be estimated with average data on the stock and use of equipment and infrastructure and the associated electricity demand. Another approach is taken with so-called CO_2 calculators; with these, the starting point for calculating the resulting environmental effects, including the individual CO_2 footprint, is usually not average data but individual assumptions or information on the stock and usage habits. Current results show an assumed average private use of digital devices and services with a carbon footprint of around 740 kg CO_2e per year and person; with intensive use, this value rises to around 1,050 kg CO_2e per year. If one relates these results to the annual per capita emissions in Germany of around 11 t CO_2e, the shares are between 6.7 and 9.5 percent. In view of the ambitious climate protection goals, these shares are problematic, since according to the forecasts to date they are stagnating at best but are more likely to increase due to an increasing number of ICT devices and more intensive use. Both usage profiles show that GHG emissions from the production of ICT devices are by no means negligible. Its share is between 50 and 60 percent of the digital carbon footprint.

Even if the figures calculated are only an estimate, their magnitude alone shows that considerable efforts still need to be made to reduce greenhouse gas emissions, both in end devices and in data networks and data centres. This is the only way to make digitalisation sustainable. Important starting points for tapping into reduction potentials are increasing the energy efficiency of ICT end devices and data centres, extending the useful life of ICT devices, developing efficient software and using renewable energies for the power supply of ICT infrastructure.

Further case studies on the calculation of the carbon footprint carried out in this study show that the calculation of the carbon footprint is quite feasible using basic data for frequently used ICT end devices and ICT services. The difficulties lie rather in the interpretation, classification and, if necessary, extrapolation of results on possible overall GHG reduction potentials through the use of digital technologies. This can be illustrated by three examples as follows:

- The transmission of videos via the internet is currently an important driver of growing data traffic. Video streaming is a digital service that makes it possible to consume media "on demand" from a large selection of films, independent of time and immediately. This enables media consumption that did not exist before compared to linear television or renting films from video stores. Video streaming is a digital technology that does not substitute an existing consumption model but enables new consumption possibilities – at the cost of additional GHG emissions.

- In the case of mobile work/home office, it depends very much on the design whether GHG emissions can actually be saved to a significant extent compared to face-to-face work in the office. In particular, as long as parallel structures are maintained and appropriate equipment is provided, and no significant amount of commuting by car is saved, the achievable GHG emission reduction potentials are low.

- In contrast, videoconferencing, which helps to avoid long business-trips, can contribute significantly to saving GHG emissions, even under the situation assumed here that high-resolution videos are transmitted in virtual conferences.

Comparable to results from current literature, the calculations and estimates carried out here also point to fundamental problems associated with the identification and comparison of GHG reduction potentials of digital applications. For example, the reduction potentials essentially depend on what is considered the reference or "business as usual" in each case. Furthermore, it must be ensured that not only use cases with potentially high reduction potentials are considered, but also use cases with the potential to increase GHG emissions. Finally, for a directionally sound assessment of digital applications, the overall economic system interrelationships must also be considered appropriately. Against this background, in addition to even more accompanying research, efforts are also required to provide generally recognised basic data for central ICT products and services (for example, key performance indicators for data centres or the CO_2 intensity in the use of digital services such as video streaming) and to bring about an agreement on basic accounting rules for digital application technologies.

The study's evaluation of the development of energy demand and the associated GHG emissions from the use of ICT, data centres and telecommunications networks in Germany and the three concrete case studies with calculation of the carbon footprint illustrate the ambivalence of the current development. It is true that digital technologies offer opportunities in many sectors to achieve ambitious climate goals. However, these opportunities are offset by considerable risks due to growing energy consumption and the associated greenhouse gas emissions. These risks result from the direct effects examined here through the production and use of ICT end devices and the ICT infrastructure, but also through indirect effects because of rebound and induction effects. Effective and coherent political governance is therefore needed both to realise the opportunities and to mitigate the risks.

A climate protection-specific digital policy can and should exploit a correspondingly broad spectrum of regulatory options for action. The analysis conducted in the study shows that environmental policy has recognised this and relies on diverse instruments: Thus, both instruments of indirect (incentive) control, such as the promotion of promising technologies or "green" procurement, and direct, regulatory instruments of behavioural control, such as eco-design standards for end devices and digital infrastructures, are being developed and implemented. However, policy also relies on publicly funded research and overarching strategies, such as the creation of specific data spaces and data strategies, to provide environmental policy actors with the technological, economic and informational means to develop innovative solutions. A particular challenge in designing and adapting governance instruments is to be able to keep pace with the innovation dynamics of digital technologies and business models.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele der Studie

Der globale Klimawandel gefährdet die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit. Dennoch steigt der weltweite Ausstoß klimaschädlicher Gase nahezu ungebremst an. Allein in den zwei Dekaden zwischen 1998 und 2018 sind die jährlichen CO_2-Emissionen um über 50 Prozent von ca. 24 Mrd. Tonnen auf nahezu 37 Mrd. Tonnen angewachsen (Global Carbon Project 2020). In den ersten Monaten der Corona-Pandemie sanken die Treibhausgasemissionen zwar rapide, bedingt durch die Einschränkungen zum Infektionsschutz (Le Quéré et al. 2020). Allerdings ist noch nicht abzusehen, ob, wie lange sowie in welchem Ausmaß diese Entwicklung anhalten wird. Vielmehr ist zu erwarten, dass mit dem Einsetzen einer globalen wirtschaftlichen Erholung auch die CO_2-Emissionen erneut steigen werden. An nationalen und internationalen Klimaschutzbemühungen sollte daher zwingend festgehalten werden, um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 zu erreichen, d.h. die globale Erwärmung auf 1,5°C bzw. weit unter 2°C zu begrenzen. Eine weitreichende und schnelle Dekarbonisierung der globalen Wirtschaft und zahlreicher Lebensbereiche ist zur Erfüllung dieser Ziele unumgänglich.

Bis zum Jahr 2030 soll laut Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) der Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland zunächst um mindestens 65 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden. Im Jahr 2020 lagen die Treibhausgasemissionen in Deutschland knapp 41 Prozent unter dem Niveau von 1990 (Umweltbundesamt 2020b). Bis zum Jahr 2045 möchte Deutschland klimaneutral werden. Eine Studie des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) geht von notwendigen Mehrinvestitionen in Höhe von bis 2,3 Billionen Euro bis 2050 aus, um den Ausstoß von Treibhausgasen Sektor übergreifend um 95 Prozent zu senken (Gerbert et al. 2018). Dies entspricht laut der Studie bis 2050 durchschnittlichen jährlichen Mehrinvestitionen in Höhe von ca. 1,8 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts. Nach Abzug von Energieeinsparungen lägen die direkten volkswirtschaftlichen Mehrkosten bei etwa 960 Milliarden Euro bis 2050 und damit bei etwa 30 Milliarden Euro pro Jahr (ebd.).

Mit Blick auf den klimaneutralen Umbau zentraler wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bereiche, wie etwa Industrie, Energieversorgung, Verkehr, Landwirtschaft und Wohnen, wird dabei häufig das Potenzial der Digitalisierung hervorgehoben. Digitale Technologien und Anwendungen, wie etwa Künstliche Intelligenz und das Internet der Dinge („Internet of things“ – IoT), so das Argument, können einen wichtigen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen, zur Vermeidung von Treibhausgasen und zur Umsetzung nachhaltiger Produktions- und Konsumweisen leisten. Allerdings sind die Auswirkungen der Digitalisierung auf den Klimawandel höchst ambivalent und werden kontrovers diskutiert. So gehen die Autoren einer Studie für den Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) davon aus, dass mit Blick auf die bisherige Studienlage zwischen 1,8 und 3,2 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 direkt auf Informations- und Kommunikationstechnologien zurückzuführen sind (Bieser et al. 2020). Für den größten Anteil an Emissionen seien dabei IKT-Endgeräte und Unterhaltungselektronik verantwortlich. Diese werden zwar immer energieeffizienter, doch trage ihre steigende Anzahl und die treibhausgasintensive Herstellungsphase der Geräte dazu bei, dass ihre klimaschädlichen Emissionen auch in Zukunft steigen werden (ebd.).

Diese Entwicklung ist beispielhaft für den sogenannten Rebound-Effekt. Durch ihn können positive Auswirkungen auf die Umwelt gemindert oder gar komplett ins Gegenteil verkehrt werden. Ob der Einsatz digitaler Technologien in verschiedenen Sektoren helfen kann, einen Beitrag zum Klima-

schutz zu leisten, ist daher von einer Vielzahl an Variablen abhängig, wie etwa dem genauen Anwendungsbereich, technischen Spezifikationen, dem Strommix, mit dem ein Gerät betrieben wird, den Anreizen, die digitale Geschäftsmodelle setzen und dem Verhalten des Endnutzers, regulativen Rahmenbedingungen, u.v.m. Wie die Potenziale digitaler Technologien für den Klimaschutz gehoben und Rebound-Effekte vermieden oder gemindert werden können, ist jedoch in vielen Bereichen bislang nicht ausreichend erforscht (Gensch et al. 2019).

Vor diesem Hintergrund gibt die Studie in Kapitel 2 zunächst einen Überblick über den Stand der Digitalisierung in Deutschland im europäischen Vergleich. Dafür geht sie vertieft auf verschiedene Sektoren und Digitalisierungstrends ein. Kapitel 3 befasst sich mit der Digitalisierung in der umwelt- und klimapolitischen Diskussion und beschreibt die Chancen der Digitalisierung für den Klimaschutz an konkreten Anwendungsbeispielen in den Sektoren Energie, Verkehr, Industrie und Gebäude. Diesen Chancen werden in Kapitel 4 Risiken durch Energieverbräuche und den damit zusammenhängenden Treibhausgasemissionen gegenübergestellt. Für ausgewählte Digitalanwendungen erfolgen hier auch Berechnungen zum CO_2-Fußabdruck. Kapitel 5 erläutert politische Instrumente, die eine klimafreundliche Gestaltung der Digitalisierung befördern können.

1.2 Unser Verständnis von Digitalisierung

Der Begriff „Digitalisierung“ ist heute nahezu allgegenwärtig. Je nach Kontext ist er mit unterschiedlichen Bedeutungen besetzt. Digitalisierung im ursprünglichen Sinne bezeichnet den Umwandlungsprozess eines kontinuierlichen in ein diskretes zweiwertiges Signal. In einem weiteren Sinne wird damit beispielsweise die Umwandlung eines Gemäldes in eine Bilddatei oder eines gesungenen Liedes in eine Audiodatei verstanden, also die Erstellung eines sogenannten Digitalisats durch ein entsprechendes technisches System, wie auch dessen Speicherung und Verarbeitung. Digitalisierung als technischer Prozess der Datenumwandlung ist somit durch einen instrumentellen Charakter gekennzeichnet, der den sozialen, ökologischen oder auch ökonomischen Zusammenhang ausblendet.

Zumeist wird Digitalisierung jedoch wesentlich breiter als dieser grundlegende technische Prozess verstanden. So bezeichnet Digitalisierung unter anderem die Einführung und fortschreitende Durchdringung unterschiedlichster gesellschaftlicher Bereiche durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Doch auch die tiefgreifenden Wandlungsprozesse in den sozialen Strukturen und kulturellen Praktiken von Gesellschaften, die mit der Ausbreitung von IKT in Verbindung stehen – also beispielsweise neue Formen der Kommunikation, innovative Geschäftsmodelle, neue Formen von Produktion und Konsum – werden häufig mit dem Begriff der Digitalisierung gleichgesetzt. Zugespitzt wird dieses Begriffsverständnis mit Bezeichnungen wie etwa „Digitale Revolution“ oder „Digitale Transformation“. Werden die systemischen und langfristigen Implikationen dieses Wandels einbezogen, so kann Digitalisierung schließlich auch als globales Epochenphänomen verstanden werden, das durch einen neuen Gesellschaftstypus geprägt ist. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die hier skizzierten unterschiedlichen Begriffsverständnisse.

Im Rahmen dieser Studie wird Digitalisierung als ein komplexer sozio-technischer Wandlungsprozess verstanden. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass die zunehmende Vernetzung einer immer größeren Anzahl an Endgeräten sowie wachsende Speicher- und Rechenkapazitäten zugleich Ergebnis als auch Grundlage einer tiefgreifenden gesellschaftlichen Transformation sind.

Tabelle 1: Überblick Begriffsverständnisse Digitalisierung

Begriffsverständnis	Kurzbeschreibung
Digitalisierung als Signalumwandlung	Technische Umwandlung kontinuierlicher Signale in nur aus zwei diskreten Werten („Einsen“ und „Nullen“) bestehende Bitfolgen. Ursprünglicher Begriff aus den 70er Jahren.
Digitalisierung als Erstellung eines Digitalisats	Umwandlung eines analogen Trägermediums (beispielsweise Buch oder Fotonegativ) in ein entsprechendes digitales Format (beispielsweise JPEG, PDF oder ein ebook-Format), Digitalisat genannt.
Digitalisierung als Ausbau der IKT-Nutzung	Prozess der Einführung oder der zunehmenden Nutzung von IKT-Technik in einem Gemeinwesen, einer Organisation oder einem beliebigen gesellschaftlichem Feld.
Digitalisierung als Veränderung sozialer Strukturen und kultureller Praktiken	Die systemischen Effekte von IKT-Nutzung in Teilbereichen der Gesellschaft, beispielsweise Wissenspraktiken, Arbeitsorganisation, Zeitbudgets, Verwaltungsroutinen, Geschäftsmodelle, Wertschöpfungsketten, Teilhabechancen, Lebensstile, Konsummustern etc.
Digitalisierung als Epochenphänomen	Durch die IT-Techniken mitbewirkter weltweiter historisch-revolutionärer Prozess; oftmals assoziiert mit Begriffen wie Informationszeitalter, Computerzeitalter, Postindustrielle Gesellschaft, digitale Gesellschaft, Netzwerkgesellschaft, Wissensgesellschaft, etc.

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

1.3 Bewertung der Auswirkungen digitaler Technologien

Die tiefgreifenden gesellschaftlichen Wandlungsprozesse im Zuge der Digitalisierung sind nicht losgelöst von ihren Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und Entwicklungen, wie dem anthropogenen Klimawandel, zu betrachten. Um diese komplexen Wirkungen zu strukturieren und potenzielle negative wie positive Effekte bewerten zu können, hat sich ein Mehrebenenmodell zur Analyse der Umweltwirkungen, aber auch anderer Effekte, digitaler Technologien etabliert (Hilty 2008). Dieses unterscheidet zwischen folgenden Ebenen:

Direkte Auswirkungen oder Effekte erster Ordnung entstehen entlang des Lebenszyklus, also der Herstellung, Verteilung, Nutzung und Entsorgung bzw. dem Recycling von IKT-Produkten, wie etwa mobilen Endgeräten, Netzinfrastrukturen, Daten- und Rechenzentren. Wenngleich es bereits seit rund zwei Jahrzehnten umfassende Forschung mit anerkannten Methoden, wie Ökobilanzen oder Lebenszykluskosten-Analysen zu diesen direkten Effekten gibt, bestehen weiterhin erhebliche Lücken in ihrer Bewertung, beispielsweise auch in Bezug auf die sozialen Folgekosten der Herstellung von IKT-Produkten. Zudem erfordert der technologische Wandel eine stete Nachjustierung der Analysemethoden sowie neue Datengrundlagen. Dies führt häufig dazu, dass solche Analysen im Moment ihres Erscheinens die Wirkungen eines bereits überholten Stands der Technik abbilden. Aus der Bewertung direkter Effekte digitaler Technologien lassen sich daher nur begrenzt Prognosen für die Zukunft ableiten.

Indirekte Auswirkungen oder Effekte zweiter Ordnung bezeichnen all jene Veränderungen in Ressourcennutzung und Umweltverbrauch, aber auch in Wirtschaft und Gesellschaft allgemein, die

durch den Einsatz von IKT in verschiedenen Anwendungsbereichen entstehen. Sie unterscheiden sich von direkten Effekten in der Nutzungsphase dadurch, dass sie die Auswirkungen eines oder mehrerer IKT-Produkte im Zusammenspiel beispielsweise auf die Gesamtenergiebilanz eines bestimmten Teilsystems betrachten. Ein Beispiel dafür wäre der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI), um einen Produktionsablauf in der industriellen Fertigung energieeffizienter zu gestalten. Allerdings sind derartige Analysen methodisch sehr anspruchsvoll. Sie setzen zumeist spezifische Rahmenbedingungen voraus und sind auf klar abgegrenzte Systeme zugeschnitten, um eine Quantifizierung von Umweltauswirkungen überhaupt zu ermöglichen. Somit sind sie nur bedingt übertragbar oder verallgemeinerbar. In der einschlägigen Diskussion wird zudem vielfach darauf hingewiesen, dass die Bewertung indirekter Wirkungen digitaler Technologien häufig die sogenannten Rebound-Effekte außenvorlassen. Diese entstehen beispielsweise, wenn ein effizienterer Energieeinsatz die Produktion kostengünstiger werden lässt und daher die Produktion gesteigert wird. Somit können Ressourceneinsparungen in der Gesamtbetrachtung schnell geschmälert oder gar ins Gegenteil verkehrt werden.

Systemische Auswirkungen oder Effekte dritter Ordnung entstehen durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien und grundlegenden gesellschaftlichen Strukturen und Verhältnissen, wie etwa Lebensstilen, Organisation und Formen von Arbeit, dem Energiesystem, Konsum- und Produktionsmustern, gesellschaftlichen Teilhabechancen u.v.m. Ein Beispiel dafür wäre die Entstehung der Plattform-Ökonomie mit Unternehmen wie Uber oder AirBnB, die mit neuen Geschäftsmodellen, Beschäftigungsformen und Konsumangeboten verbunden ist. Auch hier entstehen Rebound-Effekte sowie nicht-intendierte Konsequenzen. Aufgrund ihrer vielschichtigen Wechselwirkungen entziehen sich diese Effekte einer eindeutigen Quantifizierung und können mit Blick auf die Zukunft höchstens grob durch Szenario-Methoden, die eine Vielzahl an potenziellen Einflussfaktoren einbeziehen, modelliert werden. Daher werden diese systemischen Auswirkungen in dieser Studie nicht eingehend betrachtet.

2 Status quo und Trends der Digitalisierung in Deutschland

2.1 Stand der Digitalisierung in Deutschland

Versteht man Digitalisierung als einen komplexen sozio-technischen Wandlungsprozess, so lässt sich der Grad der Digitalisierung eines Landes nicht absolut vermessen. Allerdings können ausgewählte Kennzahlen dabei helfen, den Stand der Digitalisierung in einem Land zu charakterisieren, abzuschätzen und ihn mit dem Stand anderer Länder zu vergleichen. Die meisten Indizes, die von internationalen Organisationen oder Unternehmen zur Bewertung der Digitalisierung in verschiedenen Ländern entwickelt wurden, bedienen sich dabei verschiedener thematischer Kategorien, um ein möglichst facettenreiches Bild der Digitalisierung zu zeichnen. Diese umfassen beispielsweise den Stand des Infrastrukturausbaus, digitale Kompetenzen der Nutzer, Verbreitung und Nutzung digitaler Technologien sowie makroökonomische Rahmenbedingungen.

Für die Betrachtung des Status quo der Digitalisierung in Deutschland orientiert sich diese Studie an dem Digital Economy and Society Index (DESI) der Europäischen Union (European Commission 2020b). Der DESI bewertet die digitale Performance und Wettbewerbsfähigkeit der Mitgliedsländer der Europäischen Union anhand von 37 Indikatoren in fünf unterschiedlich gewichteten Kategorien (ausführliche Betrachtung siehe Anhang). Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zusammensetzung des Index.

Tabelle 2: Überblick des Digital Economy and Society Index

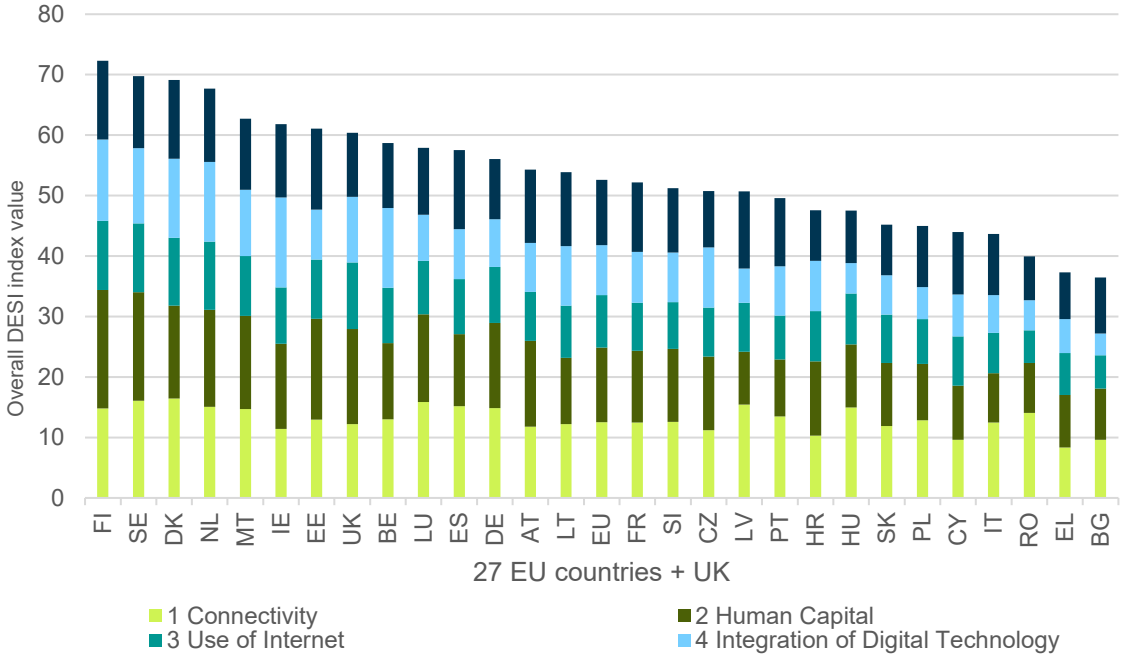
Kategorie	Gewichtung	Kurzbeschreibung
Konnektivität	25%	Festnetz- und mobile Breitbandnutzung und -abdeckung, Preise für Breitbandnutzung, 5G-Bereitschaft
Humankapital	25%	Fähigkeiten von Internetnutzern, beschäftigte IKT-SpezialistInnen und Absolventen im IKT-Bereich
Nutzung von Internetdiensten	15%	Internetnutzung, Online-Aktivitäten wie etwa Nutzung sozialer Netzwerke, Musik- und Videodienste, Onlinehandel und Online-Banking
Integration digitaler Technologien	20%	Nutzung von elektronischen Informationsdiensten, sozialen Medien, Big Data und Cloud-Diensten durch Unternehmen, Umfang Onlinehandel
Digitale öffentliche Dienstleistungen	15%	Angebot digitaler öffentlicher Dienstleistungen für Unternehmen und Privatpersonen

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf European Commission (Hg.): Digital Economy and Society Index (DESI) 2020 Methodological note. Online verfügbar unter file:///C:/Users/Admin%20SB/Downloads/DESI2020-MethodologicalManual.pdf

Deutschland rangiert im DESI an zwölfter Stelle von 28 Ländern und damit knapp vor dem europäischen Durchschnitt (siehe Abbildung 1). Besonders positiv auf die Bewertung wirken sich dabei die guten grundlegenden digitalen Fähigkeiten und Software-Kompetenzen der Bevölkerung, wie auch die aktive Internetnutzung durch Privatpersonen aus (Europäische Kommission 2020b). In Bezug auf Konnektivität erzielt Deutschland sehr gute Werte bei der Bereitschaft für den neuen Mobilfunkstandard 5G, den Breitbandpreisen und der allgemeinen Festnetz-Breitbandnutzung. Allerdings rangiert das Land weiter unterhalb des europäischen Durchschnitts was die Abdeckung mit Netzen mit sehr hoher Kapazität betrifft (ebd.). Auch wirken sich der geringe Digitalisierungsgrad öffentlicher

Dienstleistungen wie auch eine noch relativ schwache Durchdringung und Nutzung digitaler Technologien in der deutschen Wirtschaft negativ auf den Rang Deutschlands im DESI aus (ebd.).

Abbildung 1: Digital Economy and Society Index (DESI) 2020: Deutschland im europaweiten Vergleich



Quelle: European Commission: The Digital Economy and Society Index (DESI). DESI 2020. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi, zuletzt aktualisiert am 19.06.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Im Folgenden wird der Stand der Digitalisierung in Deutschland – orientiert an den Kategorien des DESI – genauer betrachtet. Dabei werden weitere, im DESI nicht berücksichtigte Aspekte und Kennzahlen herangezogen, um zentrale digitale Entwicklungen in Deutschland aufzuzeigen und dem Fokus dieser Studie auf verschiedene Anwendungsfelder digitaler Technologien besser gerecht zu werden. Auf digitale Kompetenzen der Nutzerinnen und Nutzer wird hingegen an dieser Stelle nicht vertieft eingegangen.

2.1.1 Datenvolumen und digitale Infrastrukturen

Infrastrukturen zur Datenübertragung, -speicherung und -verarbeitung sind das Rückgrat der Digitalisierung in Deutschland und gewinnen mit der Ausbreitung digitaler Anwendungen und damit verbundenen steigenden Datenvolumen immer mehr an Bedeutung. Allein zwischen 2012 und 2019 hat sich die jährliche Datenübertragung durch Breitbandanschlüsse im Festnetz laut Analysen und Berechnungen der Bundesnetzagentur von sieben Mrd. Gigabyte auf 52 Mrd. Gigabyte erhöht (Bundesnetzagentur 2019). Das Datenvolumen pro Nutzer und Monat stieg im selben Zeitraum von 17 Gigabyte auf 127 Gigabyte (ebd.). Noch dynamischer entwickelte sich die Datenverkehrsmenge im Mobilfunk, wenngleich auf einem niedrigeren absoluten Niveau: Lag die Datenübertragung im Jahr 2012 noch bei insgesamt 156 Mio. Gigabyte, gehen Berechnungen der Bundesnetzagentur davon aus, dass dieser Wert Ende 2019 ca. 2.765 Mio. Gigabyte erreicht hat (ebd.). In dieser Entwicklung spiegelt sich die zunehmend mobile Internetnutzung der Bevölkerung wider.

In Bezug auf den Versorgungsstand mit Breitband zeigt sich ein differenziertes Bild. Im Zuge der Breitbandstrategie der Bundesregierung wurde die Versorgung privater Haushalte mit leistungsfähigen Breitbandanschlüssen in den letzten Jahren immer weiter verbessert (ebd.). Wie der Breitbandatlas des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zeigt, können (Stand Ende 2019) fast 92 Prozent der Haushalte mit einer Breitbandgeschwindigkeit von mindestens 50 Mbit/s surfen (BMVI 2019). Über höhere Übertragungsraten von mindestens 200 bzw. 400 Mbit/s verfügten Ende 2019 rund 75 bzw. 66 Prozent der Haushalte (ebd.).

Allerdings zeigt sich ein deutliches Gefälle zwischen urbanen und ländlichen Regionen in puncto Breitbandverfügbarkeit und -geschwindigkeiten, was insbesondere auf die höheren Ausbaukosten in ländlichen Regionen zurückzuführen ist. So waren Ende 2019 etwas mehr als 97 Prozent der Haushalte in städtischen Gemeinden mit einer Bandbreite von mindestens 50 Mbit/s versorgt. In halbstädtischen Gemeinden trifft dies nur auf knapp 89 Prozent der Haushalte und in ländlichen sogar nur auf knapp 73 Prozent der Haushalte zu (ebd., siehe Tabelle 3). Noch deutlicher tritt der Unterschied zwischen ländlichen und städtischen Regionen bei höheren Übertragungsgeschwindigkeiten hervor. Weiterhin ist anzumerken, dass die Breitbandanbindung teils erheblich zwischen den einzelnen Bundesländern variiert.

Tabelle 3: Darstellung der Breitbandverfügbarkeit nach Gemeindeprägung (städtisch, halbstädtisch, ländlich) in % der Haushalte

Prägung	≥16 Mbit/s	≥30 Mbit/s	≥50 Mbit/s	≥100 Mbit/s	≥200 Mbit/s	≥400 Mbit/s	≥1000 Mbit/s
Städtisch	99,0	98,0	97,4	93,8	89,8	84,2	60,5
Halbstädtisch	93,7	91,1	88,7	76,6	64,3	50,5	24,1
Ländlich	81,9	77,7	72,8	53,4	33,3	19,6	12,2

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2019): Bericht zum Breitbandatlas Teil 1: Ergebnisse. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-ende-2019-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

Somit konstatiert die Bundesnetzagentur, dass es vor allem beim Ausbau der Breitbandverfügbarkeit in ländlichen Gebieten noch Nachholbedarf gibt (ebd.). Allerdings verweist sie in ihrem Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2018/2019 darauf, dass die Breitbandversorgung durch die bestehenden Infrastrukturen die Alltagsbedarfe vieler Nutzerinnen und Nutzer bislang ausreichend deckt. Vor allem mit Blick auf Geschwindigkeiten von mindestens 100 Mbit/s steht Deutschland dank der Leistungsfähigkeit seiner Kupfer- und HFC-Netze, also Glasfasernetze, die über Koaxialkabel mit dem Verbraucher verbunden sind, im europäischen Vergleich gut da. Dennoch geht die Bundesnetzagentur davon aus, dass der Ausbau von Glasfasernetzen in Deutschland im Zuge privatwirtschaftlicher Investitionen und durch Beihilfeprogramme sowie Rahmenregelungen des Bundes und der Länder in den kommenden Jahren weiter an Dynamik gewinnen wird (ebd.). Was die Versorgung der Haushalte mit 4G über alle Mobilfunkbetreiber hinweg betrifft, reicht Deutschland mit 98 Prozent an führende europäische Länder wie etwa Belgien, Finnland oder Schweden heran, die ca. 100 Prozent Abdeckung erreichen (ebd.). Ein Blick auf die durchschnittliche 4G-Verfügbarkeit, die sich aus dem Durchschnitt der Zahlen zur

Haushaltsabdeckungen der jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber eines Landes ergibt, zeigt jedoch, dass hier alle Netzbetreiber – wenn auch in unterschiedlichen Maßen – noch weitere Anstrengungen vornehmen müssen (ebd.).

Neben den Übertragungsnetzen hat in den vergangenen Jahren auch der Ausbau von Rechen- und Datenzentren in Deutschland stark zu genommen. Insbesondere zwischen 2014 bis 2017 wurden in Deutschland erhebliche Kapazitäten im Bereich von Rechenzentren ausgebaut, womit es gelang, sich im europäischen Wettbewerb um Rechenzentrumskapazitäten gut zu positionieren (Clausen und Hintemann 2018). Dieser Anstieg spiegelt sich in der Darstellung in Tabelle 4 wider, wobei besonders deutlich wird, dass sich insbesondere der Ausbau großer Rechenzentren verstärkt hat. Deren Zahl verdoppelte sich innerhalb von zehn Jahren auf 90.

Tabelle 4: Anzahl der Rechenzentren in Deutschland nach Rechenzentrumskategorie in den Jahren 2007, 2013 und 2017

Rechenzentrumskategorie	2007	2013	2017
Serverschrank (3-10 m²)	33.700	30.500	30.500
Serverraum (11-100 m²)	18.100	18.100	19.900
Kleines Rechenzentrum (101-500 m²)	1.700	2.150	2.500
Mittleres Rechenzentrum (501-5000 m²)	210	280	330
Großes Rechenzentrum (über 5000 m²)	45	70	90

Quelle: Hintemann, Ralph (2017): Update 2017: Rechenzentren in Deutschland. Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/Kurzstudie-RZ-Markt-Bitkom-final-20-11-2017.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2020.

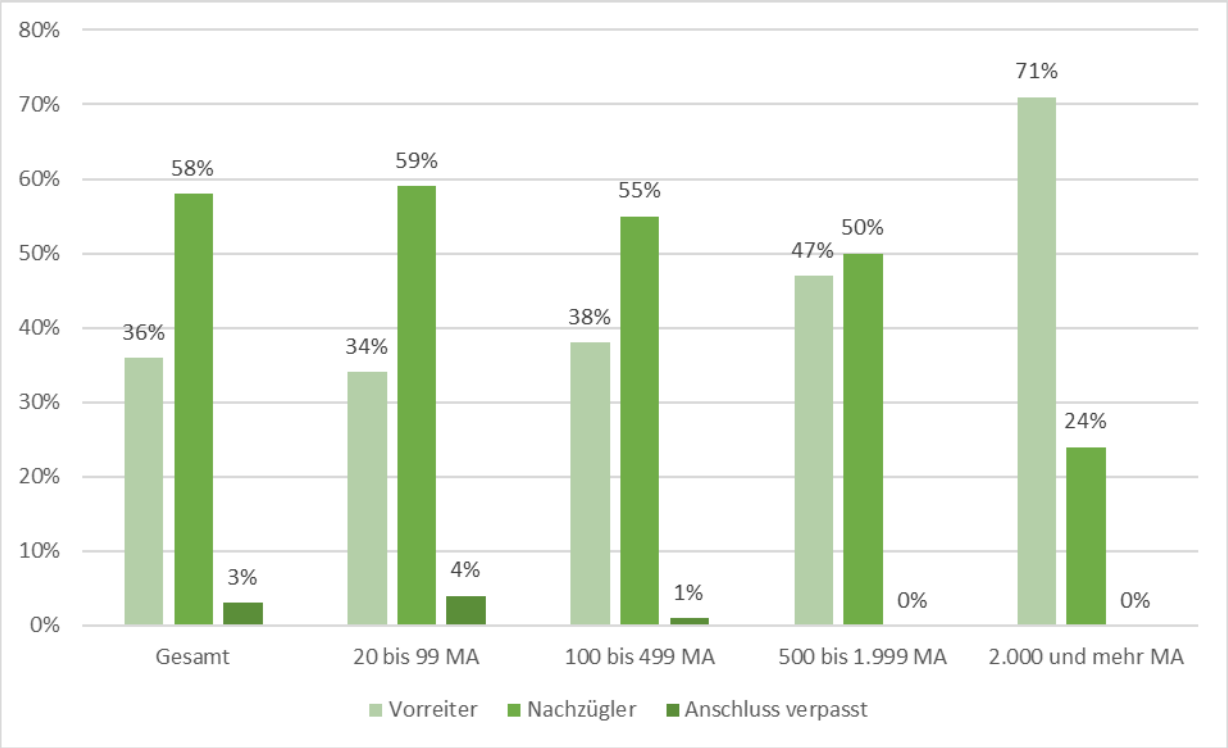
2.1.2 Digitalisierung der Wirtschaft und IKT-Sektor

Zwar nutzen deutsche Unternehmen zunehmend die Möglichkeiten digitaler Technologien, wie etwa Big-Data-Analysen, Cloud-Dienste und elektronischen Informationsaustausch – dennoch liegt Deutschland in Bezug auf die Digitalisierung der Wirtschaft nur im europäischen Mittelfeld (Europäische Kommission 2019). Rund 17.500 Unternehmen im produzierenden Gewerbe und im Bereich überwiegend unternehmensorientierter Dienstleistungen bzw. 5,8 Prozent der Unternehmen dieser Branchen haben im Jahr 2019 KI in Produkten, Dienstleistungen oder internen Prozessen genutzt (Rammer et al. 2020). Allerdings war KI für nur 2.100 dieser Unternehmen ein essenzieller Bestandteil ihres Geschäftsmodells (ebd.). Rund 45 Prozent der deutschen Industrieunternehmen und 38 Prozent der Dienstleistungsunternehmen nutzten zudem laut dem BMWi-Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL in 2018 bereits das Internet der Dinge (Bertschek et al. 2018). Doch gaben von ihnen auch 39 Prozent (Dienstleister) bzw. 35 Prozent (Industrie) an, dass sie das Thema nicht als relevant betrachten (ebd.). Robotik, Sensorik und Industrie 4.0-Anwendungen kommen vor allem im Maschinenbau bereits intensiver zum Einsatz. Fast ein Drittel der befragten Unternehmen dieser Branche gab an, Robotik, Sensorik oder automatische Prozesssteuerung zu nutzen; rund ein Fünftel hatte in 2018 bereits Systeme und Produktionsprozesse unternehmens- und standortübergreifend vernetzt (ebd.).

Insgesamt blickt die deutsche Wirtschaft jedoch eher skeptisch auf den eigenen Stand der Digitalisierung. Laut einer Studie des Bitkom e.V. schätzen rund 58 Prozent der befragten Geschäftsführerinnen und Geschäftsführer sowie Vorstände ihr Unternehmen eher als Nachzügler in puncto Digitalisierung ein (Streim 2020). Als Vorreiter in Sachen Digitalisierung sehen sich 36 Prozent der befragten Unternehmen. Deren Anteil ist in der Gruppe der Unternehmen ab 2.000 Mitarbeitenden besonders groß und erreicht dort 71 Prozent (ebd., siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Einschätzung des eigenen Digitalisierungsstands aus Unternehmensperspektive

Fragestellung: Wo steht Ihr Unternehmen generell beim Thema Digitalisierung?



Basis: Alle befragten Unternehmen (n=502)

Quelle: Eigene Grafik basierend auf Darstellung in Andreas Streim (2020): Deutsche Wirtschaft läuft der Digitalisierung weiter hinterher. Bitkom e.V. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-Wirtschaft-laeuft-der-Digitalisierung-weiter-hinterher, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Besonders kleine und mittelständige Unternehmen hängen in der Digitalisierung hinterher. So stellt die Studie fest, dass jedes der befragten Unternehmen mit mehr als 2.000 Beschäftigten über eine Digitalstrategie verfügt. Von den Unternehmen mit 100 bis 1.999 Beschäftigten haben 92 Prozent eine ausgearbeitete Digitalstrategie, während diese nur 72 Prozent der kleineren Unternehmen zwischen 20 und 99 Beschäftigten haben (Streim 2020).

Auch im Vergleich der Branchen zeigen sich nach dem Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL des BMWi deutliche Unterschiede beim Digitalisierungsgrad. So führen der IKT-Sektor, wissensintensive Dienstleister sowie Finanz- und Versicherungsdienstleister aktuell den digitalen Wandel in der Wirtschaft an, während das Gesundheitswesen, aber auch der Fahrzeugbau in Deutschland bislang zu den Schlusslichtern gehören (Bertschek et al. 2018).

Obwohl es auf Seiten der deutschen Unternehmen noch erheblichen Aufholbedarf in Sachen Digitalisierung gibt, hat der IKT-Sektor selbst in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Laut

Berechnungen des ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung rangierte sein Beitrag zur Bruttowertschöpfung mit 5,1 Prozent im Jahr 2019 noch vor den Sektoren Verkehr und Logistik (4,8 Prozent) und nur geringfügig hinter der Branche Grundstoffe, Chemie und Pharma (5,2 Prozent) (BMWi 2020a). Rund 102.000 Unternehmen umfasste die IKT-Branche im Jahr 2019, denen insgesamt ca. 1,28 Millionen Erwerbstätige angehörten (ebd.). Das sind 43.000 mehr Beschäftigte als im Vorjahr; im Vergleich zu 2009 hat sich die Summe der Erwerbstätigen im IKT-Sektor sogar um 40 Prozent erhöht (ebd.).

2.1.3 Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung

Im DESI der Europäischen Union belegt Deutschland Rang 21 von 28 bei der Bereitstellung digitaler öffentlicher Dienste (Europäische Kommission 2020b). Bürgerinnen und Bürger interagieren online bisher auf einem eher geringen Niveau mit den Behörden – gerade einmal 49 Prozent der Deutschen im Netz nutzen aktiv digitale öffentliche Dienste, während es im EU-Durchschnitt rund 67 Prozent der Internetnutzer sind (ebd.). Damit ist Deutschland in Bezug auf diesen Indikator eines der Schlusslichter in der EU. Allerdings wächst das Bewusstsein und auch die Offenheit der Bürgerinnen und Bürger zunehmend gegenüber digitalen Verwaltungsangeboten – und das in allen Altersgruppen, wobei jedoch die 18 bis 34-Jähigen hier eine klare Vorreiterrolle einnehmen (Initiative D21 und TUM 2020).

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Schritte unternommen, digitale öffentliche Leistungen in Deutschland auszubauen. Mit dem E-Government-Gesetz des Bundes (EGovG) ist im August 2013 der rechtliche Rahmen für die Digitalisierung der Bundesverwaltung geschaffen worden. Darüber hinaus sind Bund, Länder und Kommunen durch das Gesetz zur Verbesserung des Onlinezugangs zu Verwaltungsleistungen (Onlinezugangsgesetz, OZG) aus dem Jahre 2017 dazu verpflichtet, bis Ende 2022 ihre Verwaltungsleistungen über Verwaltungsportale auch digital anzubieten. Knapp 600 Verwaltungsleistungen wurden inzwischen identifiziert, die flächendeckend digitalisiert werden sollten. Deren Umsetzung kommt jedoch nur schleppend voran. Zur Halbzeit des OZG sind lediglich Planungen und vereinzelte lokale Referenzprojekte als Ergebnisse vorzuweisen, obwohl sich Bund, Länder und Kommunen mit großem Engagement dieser Aufgabe gewidmet haben, wie der Nationale Normenkontrollrat konstatiert (Danken und Kühn 2020).

Eine Herausforderung läge dabei unter anderem in der mangelnden Nachvollziehbarkeit des Umsetzungsstands des OZG (ebd.). Bisher fehle zudem eine Anlaufstelle, über die sich insbesondere Kommunen zu digitalen Lösungen und deren Anforderungen für die Umsetzung informieren können. Bis Ende 2020 sei jedoch mehr Transparenz und ein Dashboard für genau diese Zwecke geplant (ebd.). Zweifelhaft bleibt dennoch, ob die Flächendeckung digitaler öffentlicher Dienste bis 2022 erreicht werden kann (ebd.). In Bezug auf das Nutzungsverhalten digitaler Verwaltungsleistungen zeigt sich zudem auch hier ein Stadt-Land-Gefälle. So werden öffentliche digitale Dienste in Städten generell intensiver genutzt als in ländlichen Gebieten (Initiative D21 und TUM 2020). Der E-Government Monitor 2020 stellte fest, dass für viele Bewohner ländlicher Gebiete der direkte Kontakt zur Behörde noch eine wichtige Rolle spielt und als der schnellste und einfachste Weg der Interaktion wahrgenommen wird (ebd.).

2.1.4 Digitalisierung privater Haushalte

Laut Angaben des Statistischen Bundesamts nutzten im Jahr 2018 rund 66,5 Millionen Menschen ab zehn Jahren – das sind rund 90 Prozent der Gesamtbevölkerung – das Internet (Statistisches

Bundesamt 2019). Das Smartphone spielt dabei eine immer größere Rolle. In 2020 nutzten rund 89 Prozent der Deutschen ein Smartphone – sogar in der Altersgruppe der Personen über 65 Jahren betrug dieser Anteil noch 79 Prozent (Deloitte Deutschland 2020).

In deutschen Haushalten hat die Digitalisierung daher bislang vor allem über Smartphones, Tablets und Desktop-Rechner Einzug gehalten. Allerdings befindet sich dieses Bild im Wandel. Bei den sogenannten Wearables, wozu beispielsweise Smartwatches, Fitnesstracker, Augmented Reality (AR)-Brillen, Head-Mounted Displays (HMD) und Kopfhörer gehören, wird von Seiten des Bitkom, des deutschen Branchenverbandes der digitalen Wirtschaft, eine deutliche Expansion erwartet. Die Verkäufe von Smartwatches nehmen in Deutschland weiterhin zu und stiegen laut Prognosen von 2,83 Mio. Stück in 2019 auf 3,16 Mio. in 2020 (Klöß 2020). Zusätzlich kommen 2020 noch 2,53 Millionen verkaufte Fitnesstracker und einfache Activity-Watches hinzu (ebd.). Zukünftige sogenannte „smart wearables“ werden dabei dank der Fortentwicklung der Sensorik einen erweiterten Funktionsumfang haben. Mögliche Beispiele hierfür sind Smartwatches, die ohne Einstich den Blutzucker messen oder den Wasserhaushalt des Körpers abschätzen. Solche einfach zu bedienenden Gesundheitstracker könnten als Folge des demographischen Wandels auf eine entsprechende Marktnachfrage treffen (ebd.).

Auch der Trend zu hochauflösenden und internetfähigen Fernsehern setzt sich fort. Zudem haben Smart Speakers, wie beispielsweise Amazons Alexa, Google Nest und der Magenta-Speaker der Telekom, nach der Bitkom-Studie ihr Marktpotential noch nicht erreicht. Auch Haushaltsroboter (zum Beispiel Roboter zum Staubsaugen und Rasenmähen) stellen in Deutschland laut der Studie des Bitkom einen Wachstumsmarkt dar. Eine Mehrheit der Deutschen (55 Prozent), die aktuell noch keine Roboter verwenden, können sich vorstellen, künftig einen zu nutzen zu nutzen (Klöß 2020).

Ein starker Trend in privaten Haushalten ist zudem die kabellose Vernetzung von Haushaltsgeräten mit dem Internet. Hierzu werden insbesondere WLAN, Bluetooth und Mobilfunk genutzt. Die Hälfte aller Menschen in Deutschland (49 Prozent) würde in den eigenen vier Wänden am liebsten alle technischen Geräte miteinander vernetzen und digital steuern – eine Zunahme von 39 Prozent gegenüber der gleichen Umfrage vor zwei Jahren (Klöß 2020).

2.2 Digitalisierungstrends

Der oben beschriebene Status quo der Digitalisierung in Deutschland bildet lediglich eine Momentaufnahme ab. Es ist zu erwarten, dass sich die Verbreitung und Nutzung digitaler Technologien in unterschiedlichen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft weiterhin dynamisch entwickeln und neue Anwendungen, Nutzungsformen und Erfordernisse an Infrastrukturen und Regulierung hervorbringen wird. Fünf zentrale, eng miteinander in Verbindung stehende Trends lassen sich dabei identifizieren, die auch für Deutschland relevant sind:

1) Zunahme vernetzter Endgeräte und das Internet der Dinge

Innerhalb der nächsten Dekade wird in Deutschland wie auch global davon ausgegangen, dass nicht nur die Zahl und Vielfalt von mit Mikroprozessortechnik ausgestatteten Geräten zunimmt, sondern auch deren Vernetzung miteinander und dem Internet. Im Bereich privater Nutzerinnen und Nutzer werden sich besonders mobile, internetfähige Endgeräte, wie Smartphones und Tablets weiterverbreiten, aber auch Wearables, wie etwa Smartwatches und Fitnesstracker. Zudem zeigt sich ein starker Trend zur Vernetzung von Geräten im Heimbereich. Unter den Schlagwörtern „Industrie 4.0“ oder „Industrielles Internet der Dinge“ ist dieser Vernetzungstrend auch in der industriellen Produktion zu beobachten. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass weltweit

die Zahl der ans Internet der Dinge angeschlossenen Geräte von 6 Milliarden in 2015 auf 20 Milliarden Geräte in 2020 wachsen wird (IEA 2020b; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2010). Mit dem autonomen oder teilautonomen Fahren von PKWs und LKWs besteht im Mobilitätsbereich ein weiterer zentraler Anwendungsfall des Internets der Dinge. Allerdings stößt die Entwicklung vollständig autonomer Fahrzeuge noch auf erhebliche Herausforderungen. Der mögliche Automatisierungsgrad eines Autos wird auf einer fünfstufigen Skala festgelegt. Momentan befindet sich die Entwicklung zwischen Stufe 2 (teilautomatisiert, beispielsweise Überholassistent) und 3 (hochautomatisiert, beispielsweise Stauassistent). Vollautomatisierte Fahrzeuge der Stufe 4 werden in den USA und China schon im Alltagseinsatz getestet, allerdings in besonders übersichtlichen Gebieten. Zahlreiche Experten gehen davon aus, dass es noch Jahrzehnte dauern kann bis Fahrzeuge der Stufe 5, welche tatsächlich autonom fahren, großflächig zum Einsatz kommen (Kroher und Rudschies 2020).

2) Zunehmende Datafizierung und Datengenerierung

Als Folge der zunehmenden Vernetzung von Geräten in den Bereichen Haushalt, Industrie und Verkehr generiert die Menschheit heutzutage in jeder Woche mehr Daten als während des gesamten letzten Jahrtausends. Die sogenannte Datafizierung, also die Erzeugung von Daten in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen, und insbesondere die dabei anfallenden Metadaten bedeuten eine immense Zunahme an auswertbarer Information, was häufig mit dem Begriff „Big Data“ beschrieben wird. Mit komplexer Software können diese enormen Datensätze zunehmend besser zur Verfolgung spezifischer Ziele und Interessen erschlossen werden. So können beispielsweise aus Daten, die vergangenes menschliches Verhalten beschreiben, mathematische Modelle gebildet werden, die zukünftiges Verhalten zumindest statistisch vorhersagen können. Eine beachtliche Anzahl digitaler Geschäftsmodelle basieren inzwischen auf der Auswertung solcher großen Datenmengen und es wird davon ausgegangen, dass deren Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft weiter zunehmen wird. Im Zuge dieses Trends gewinnen auch Fragen nach dem Schutz persönlicher Daten und nach ethischen Implikationen der Auswertung personenbezogener Datensätze an Relevanz.

3) Zunehmender Einsatz von Künstlicher Intelligenz

Dank selbstlernender Softwaresysteme können zunehmend auch komplexere Aufgaben von Maschinen übernommen werden. Datafizierung und Künstliche Intelligenz sind dabei eng miteinander verbunden: Erst mit Techniken der KI und Datenwissenschaft wird es effektiv möglich, große Datenmengen auszuwerten. Die in der letzten Dekade erzielten Erfolge in der KI-Forschung beruhen wiederum zu einem sehr großen Teil auf der Verfügbarkeit großer Datensets. Das Teilgebiet der KI, das davon mit am stärksten profitierte, ist das Maschinelle Lernen (ML). ML befasst sich mit künstlichen lernenden Systemen, die ein statistisches Modell aus Daten generieren können. Die Fortschritte in der Forschung zum Maschinellen Lernen haben zu wesentlichen Verbesserungen in den Bereichen geführt, in denen die Techniken der klassischen symbolverarbeitenden KI relativ schlecht abschnitten. Hierzu zählten insbesondere Mustererkennung, Klassifikation, Spracherkennung, Schrifterkennung, Bild- und Gesichtserkennung sowie das automatische Übersetzen. Die Nutzung derart leistungsstarker KI-Systeme in unterschiedlichsten Bereichen wird weiter an Bedeutung gewinnen. Es wird erwartet, dass der globale Markt für KI-Software von 10 Milliarden US-Dollar in 2018 auf 126 Milliarden US-Dollar im Jahr 2025 wachsen wird (Statista 2020c).

4) Zunehmende Virtualisierung

Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) sind als Technologie inzwischen in der Kommerzialisierungsphase und werden sich stärker ausbreiten. Zunächst wird dies insbesondere im Unterhaltungs- und Spielebereich erwartet. Manche AR-Anwendungen, wie Filter bei Videostreaming (z.B. für virtuelle Katzenohren) oder virtuelle Maßbänder mit dem Smartphone sind schon stark verbreitet, ohne dass dies unbedingt als AR-Anwendung wahrgenommen wird. In aktuellen Autos der Oberklasse (wie der neuen S-Klasse von Mercedes ab Ende 2020) können perspektivisch korrekt AR-Elemente in die Windschutzscheibe eingeblendet werden. So können beispielsweise Abbiegepfeile auf der richtigen Spur und im richtigen Sichtfeld des Fahrers angezeigt werden. Innerhalb der nächsten Dekade ist zu erwarten, dass alltagstaugliche AR-Brillen erhältlich sein werden. Ein wichtiger technologischer Sprung für die weitere AR-Verbreitung ist der seit kurzem mögliche Einbau von sogenannter Lidar-Sensorik in Tablets und Smartphones. Die aktive Raumerfassung durch Laserstrahlen wurde zuvor bei selbstfahrenden Fahrzeugen verwendet. Eine bessere Raumerfassung ist für AR-Anwendungen zentral, denn nur so können virtuelle Inhalte räumlich eingeblendet werden. Eine weitere Schlüsseltechnologie für AR und VR wird der neue Mobilfunkstandard 5G darstellen. Erst wenn die relativ aufwendigen 3D-Berechnungen mit geringer Verzögerung, d.h. mit kurzen Latenzzeiten, in der Cloud erledigt werden können, wird eine breite Anwendung und Adoption realistisch.

5) Steigende Rechen- und Speicherkapazität

Die beschriebenen Trends der zunehmenden Anzahl und Vernetzung von Geräten, die damit verbundene wachsende Datenmenge und der zunehmende Einsatz von KI, wie auch Technologien zur Virtualisierung, erfordern zusehends mehr Speicher- und Rechenkapazitäten. Die seit Jahrzehnten anhaltenden Fortschritte in der Miniaturisierung der Digitaltechnik, die zu immer mehr Transistoren auf kleinerem Raum und damit zu schnellerer Hardware und größeren Speicherkapazitäten führten, wird weiterhin anhalten. Langfristig zeichnen sich in der konventionellen Halbleitertechnik zwar physikalische Grenzen ab, doch diese werden innerhalb der nächsten Dekade mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden. In der Grundlagenforschung gibt es schon zahlreiche Lösungsansätze zur Ablösung der klassischen Halbleitertechnik. Bei all diesen Technologien würde die Rechenleistung oder Speicherdichte gesteigert, ohne im herkömmlichen Sinn die Dichte an Transistoren zu steigern.

Die fünf genannten, eng miteinander verbundenen Digitalisierungstrends werden nicht ohne Wirkung auf die zugrundeliegenden Infrastrukturen bleiben. Bereits heute zeigt sich der Bedarf nach einem massiven Ausbau der Datenübertragungsinfrastruktur, wie auch von Infrastrukturen im Bereich der Datenverarbeitung und -speicherung. Allein für Deutschland wird von einer Steigerung der Datenübertragung im Mobilfunknetzen von 2,8 Milliarden Gigabyte 2019 auf 3,5 Milliarden Gigabyte 2021 ausgegangen (Pauly et al. 2020). Nach einer Analyse von Cisco wird sich der deutsche mobile Datenverkehr zwischen 2017 und 2022 vervierfachen, was einer jährlichen Wachstumsrate von 30 Prozent entspricht (Cisco 2019). 2022 soll nach dieser Prognose der deutsche mobile Datenverkehr 368 Millionen Gigabytes pro Monat erreichen, was einer jährlichen Datenübertragung von 4,4 Milliarden Gigabyte entspricht. Der mobile Datenverkehr pro Person wächst danach von 1,2 Gigabyte in 2017 auf 4,5 Gigabyte in 2022 (ebd.).

In deutschen Großstädten beginnt zudem die Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G. Die Besonderheit von 5G ist die hohe erzielbare Datenrate von bis zu zehn Gbit/s und Latenzzeiten von wenigen Millisekunden bis unter eine Millisekunde. Mit einer bis zu zehnfach höheren Datenübertra-

gung als 4G (LTE) ermöglicht die neue 5G-Mobilfunkgeneration nahezu eine Echtzeit-Übertragung. Damit werden neue, auch sicherheitsrelevante Anwendungen ermöglicht. Beispiele solcher Anwendungen sind das autonome Fahren, eine noch stärker vernetzte Produktion im Sinne Industrie 4.0, aber auch digitale Anwendungen für die Gesundheitsversorgung im ländlichen Raum. Der Wandel hin zu diesem neuen Standard wird dabei aufgrund der Preisentwicklung vermutlich nicht linear ablaufen, sondern einen sich zunehmend beschleunigenden Verlauf nehmen. Global wird erwartet, dass es innerhalb von fünf Jahren 2,8 Milliarden 5G-Nutzer geben wird, die dann 30 Prozent aller Mobilfunknutzer stellen werden. Es wird angenommen, dass die Adaption von 5G durch die Verbraucher deutlich schneller voranschreiten wird als dies bei 4G der Fall war. Die COVID-19-Pandemie wird zwar zu einer anfänglichen Verzögerung gegenüber den ursprünglichen Prognosen führen, nicht aber die erwarteten Nutzerzahlen bis 2025 beeinflussen (Ericsson 2020). Zum Ende des im Rahmen dieser Studie betrachteten Zeitraumes, also 2030, wird die Einführung der technisch noch nicht spezifizierten nächsten Mobilfunk-Generation (6G) erwartet. Nach derzeitigen Einschätzungen könnte diese zukünftige Technik Datentransferraten bis zu 400 Gbit/s, also der rund vierzigfachen Geschwindigkeit des 5G-Standards erreichen. In den letzten Jahren haben dazu erste konkrete Forschungsarbeiten begonnen.

Mit Blick auf die wachsenden Datenströme und den steigenden Bedarf an Rechenkapazitäten zeichnet sich zudem ein neues Paradigma ab, um den erhöhten Datenverkehr nachhaltiger bewältigen zu können: das sogenannte Edge Computing. Damit wird eine dezentrale Verarbeitung von Datenströmen am Rande (englisch „Edge“) des Netzwerks bezeichnet. Insbesondere für das Internet der Dinge könnte Edge Computing zu einer Schlüsseltechnologie werden. Geräte im Internet der Dinge benötigen für ihre Funktionalität zwar häufig viele Sensordaten, nach der Nutzung werden diese aber obsolet. Edge Computing sortiert diese Daten ohne größere Verzögerung und nah am Ort der Entstehung vor. Nach dieser Analyse löscht es einen großen Teil der nur echtzeitrelevanten Daten und leitet nur noch die daraus abgeleiteten Erkenntnisse an die Cloud weiter. Aus ihnen kann man auch später noch einen Nutzen ziehen. So hilft Edge Computing, die IT-Infrastruktur zu entlasten und gewährleistet die für das Internet der Dinge so wichtigen schnellen Reaktionszeiten. Edge Computing ist dabei als eine Erweiterung der bestehenden Netzarchitekturen zu verstehen, nicht als deren Ablösung. Analysten prognostizieren für das Edge Computing globale Wachstumsraten von über 20 Prozent jährlich und einem hohen erwarteten Marktvolumen (ca. 15 Mrd. US-Dollar im Jahr 2025) (Hintemann 2020). Viele erwarten, dass das Edge Computing in kurzer Zeit bei der Datenverarbeitung die traditionellen Rechenzentren überholen wird (McHugh 2020). Für 2022 wird prognostiziert, dass mehr als 50 Prozent der in Unternehmen erzeugten Daten außerhalb klassischer Rechenzentren und der Cloud erzeugt und verarbeitet werden, während es 2019 noch weniger als zehn Prozent waren (McHugh 2020). Gleichzeitig wird laut einer im Juli 2020 veröffentlichten Prognose eine Stagnation der globalen Ausgaben für klassische Datencenter in diesem und im nächsten Jahr erwartet (Statista 2020a).

3 Digitalisierung und Klimaschutz

3.1 Digitalisierung in der klima- und umweltpolitischen Diskussion

Vor dem Hintergrund des wachsenden Bewusstseins für den anthropogenen Klimawandel und im Zuge des Kyoto-Protokolls begann bereits Ende der 1990er bzw. Anfang der 2000er Jahre eine vermehrte wissenschaftliche Beschäftigung mit den direkten Umweltauswirkungen von IKT. Dabei spielen neben den Auswirkungen auf den Energieverbrauch auch der steigende Bedarf an natürlichen Rohstoffen und damit verbundene Umweltprobleme, wie auch soziale Herausforderungen, eine wichtige Rolle. Mit der Verabschiedung der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen 2015 (Sustainable Development Goals, SDGs) rückte verstärkt die Frage in den Mittelpunkt, wie digitale Technologien zur Erreichung der einzelnen Ziele beitragen und negative Auswirkungen auf die Zielerreichung vermieden werden können. Insbesondere wird dabei die Rolle der Digitalisierung als Werkzeug für die Umsetzung der zentralen Transformationsprojekte, etwa der globalen Energiewende und der Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft, diskutiert. Allerdings fehlt bislang eine fundierte Analyse und Reflexion der potenziellen langfristigen und systemischen Implikationen der Digitalisierung für eine sozial wie ökologisch nachhaltige Entwicklung und eine vertiefte Beschäftigung mit der Frage, wie Zielkonflikte aufgelöst werden können. Ein Grund dafür sind u.a. die bereits erwähnten methodischen Herausforderungen für die Bewertung der komplexen Wirkungen digitaler Technologien.

In Deutschland konzentrierte sich bis vor wenigen Jahren die akademische und politische Debatte zu Digitalisierung und ihren Umweltauswirkungen vorranging auf die Frage „grüner“ Informationstechnologie oder „Green IT“, also besonders energie- und ressourceneffizienter sowie wiederverwertbarer Geräte. 2008 wurde von Seiten des Bundes eine Green-IT-Initiative[1] auf den Weg gebracht mit dem Ziel, den Energieverbrauch der Informationstechnik in der Bundesverwaltung zu reduzieren. Auch der Zwischenbericht „Wirtschaft, Arbeit, Green IT“ der Enquete-Kommission „Internet und digitale Gesellschaft“ unterbreitete Handlungsempfehlungen für nachhaltigere IT-Produkte, beispielsweise die Erhöhung der Reparaturfähigkeit oder der Ausbau von Anreizen für das Recycling von Elektrogeräten (Enquete-Kommission 2013). Nachhaltigkeits- und Klimaschutzaspekte der Digitalisierung spielten jedoch selbst in der Formulierung der Digitalen Agenda (Bundesregierung 2014) und der Umsetzungsstrategie der Bundesregierung für die Digitalisierung (Bundesregierung 2019) nur eine Nebenrolle.

Spätestens mit der im März 2020 veröffentlichten umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2020) wird jedoch ersichtlich, dass Digitalisierung zusehends als eine Gestaltungsaufgabe für Nachhaltigkeitspolitik verstanden wird. Dieses erweiterte Verständnis geht über den Bereich „grüner“, also energie- und ressourceneffizienter IKT, hinaus und schließt die Bildung von Kompetenzen und Innovationsräumen für eine nachhaltige Digitalisierung und die Schaffung eines Bewusstseins für eine verantwortungsvolle Gestaltung digitaler Technologien mit ein. Damit wird der Blick nicht mehr nur auf ökologisch relevante Aspekte, sondern stärker auch auf gesellschaftliche gelegt. Box 1 stellt einen Überblick über die Grundsätze der umweltpolitischen Digitalagenda des BMU dar.

[1] Weiterführende Informationen dazu finden sich auf der Webseite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit, https://www.bmu.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen-tourismus/produkte-und-konsum/produktbereiche/green-it/green-it-initiative-des-bundes/; zuletzt geprüft am 12. Februar 2020.

Box 1: Grundsätze der Umweltpolitischen Digitalagenda des BMU

In der Umweltpolitischen Digitalagenda des BMU werden strategische Ziele für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung formuliert und konkrete Maßnahmen für deren Umsetzung genannt. Die Agenda folgt dabei sechs Grundsätzen, die als Orientierung dienen sollen, um die Potenziale digitaler Technologien für den sozial-ökologischen Umbau zu nutzen und Risiken zu minimieren:

1) Soziale und ökologische Gestaltung der Transformation ist nur mit Digitalisierung zu schaffen.
2) Die Digitalisierung selbst muss umweltgerecht werden.
3) Digitale Technologien ermöglichen ”mehr mitweniger“ – die digital-ökologische Dividende nutzen.
4) Digitale Lösungen sind kein Selbstzweck. Die umweltpolitische Gestaltung der Digitalisierung richtet den Blick auf das Ganze.
5) Digitale Technologien helfen, Umweltpolitik und Umweltverwaltung von Bund, Ländern und Kommunen zu modernisieren.
6) Das Zeitfenster, in dem digitale Technologien als Treiber der Nachhaltigkeit wirken können, steht jetzt offen. Wir müssen die Chancen jetzt nutzen.

Quelle: BMU 2020.

Trotz des Fokus auf nachhaltigkeitsbezogene Aspekte besteht jedoch auch in der umweltpolitischen Digitalagenda ein deutlicher Bezug zu Fragen der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit und einer zukunftsfesten digitalen Wirtschaft.

Dieser Zusammenhang zwischen Digitalisierung und ökologisch verträglicher, gesellschaftlicher wie wirtschaftlicher Entwicklung zeigt sich auch auf europäischer Ebene. Die im Februar 2020 von der Europäischen Kommission vorgestellte Datenstrategie und das Weißbuch für Künstliche Intelligenz zielen darauf ab, einen europäischen Weg für die Lösung globaler Herausforderungen aufzuzeigen. Zudem stellt die Digitalstrategie der Europäischen Kommission die Digitalisierung explizit in den Dienst des „Grünen Deals“, eines Maßnahmenpakets für einen grundlegenden ökologischen Wandel der Wirtschaft Europas (European Commission 2020a). So sollen digitale Technologien unter anderem eine wichtige Rolle in einer nachhaltigen europäischen Industriestrategie sowie bei der Etablierung der Kreislaufwirtschaft spielen. Zudem wird angestrebt, den Stromverbrauch digitaler Geräte in Europa zu senken, Datenzentren und digitale Infrastrukturen bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu betreiben und die Lebensdauer und Wiederverwertbarkeit von Endgeräten zu erhöhen. Im Rahmen des Aktionsplans für Kreislaufwirtschaft wurde zudem eine Initiative angekündigt, die Ökodesign-Richtlinie, um Regulierungen für Elektronik und IKT, wie etwa Mobiltelefone, Tablets und Laptops, zu erweitern, damit diese energieeffizienter, haltbarer, reparierbar, nachrüstbar sowie besser zu warten und wiederzuverwerten werden (Europäische Kommission 2020a).

Box 2: Die Corona-Pandemie als Chance für eine klimafreundliche Digitalisierung?

Im Zuge der Maßnahmen zur Eindämmung des Virus SARS-CoV-2 haben digitale Technologien in Deutschland und in vielen Teilen der Welt einen erheblichen Bedeutungsschub erhalten. Dies zeigt sich allein im Anstieg an Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern, die ihrer Tätigkeit aus dem Homeoffice nachgehen. So ergab eine repräsentative Befragung des deutschen Digitalverbands Bitkom e.V. im März 2020, dass knapp die Hälfte der berufstätigen Befragten im Zuge der Corona-Pandemie ganz oder teilweise von zuhause aus arbeiteten (Markert und Pauly 2020). Für 18 Prozent der berufstätigen Befragten war dies Neuland und auch jene, die zuvor bereits die Möglichkeit zum Homeoffice hatten, nutzten dieses nun häufiger. Dieser Virtualisierungstrend der Arbeitswelt spiegelt sich auch in einer Studie aus dem Mai 2020 unter 500 Unternehmen unterschiedlichster Branchen und Größen wider, in der knapp 70 Prozent der Befragten angaben, dass ihre Büroarbeitenden komplett oder größtenteils von zuhause tätig sind (Hofmann et al. 2020). Zudem wurden Geschäftsreisen, Konferenzen und andere Veranstaltungen sowie in weiten Teilen auch der Schul- und Universitätsbetrieb in den digitalen Raum verlegt.

Im globalen Treibhausgasausstoß machen sich die durch die Pandemie veränderten Lebens- und Fortbewegungsweisen sowie der Einfluss auf Produktions- und Konsummuster deutlich bemerkbar. So sanken laut Berechnungen des Global Carbon Project im Jahr 2020 die weltweit durch die Industrie und die Nutzung fossiler Brennstoffe verursachten CO_2-Emissionen um insgesamt sieben Prozent im Vergleich zum Vorjahr (McSweeney und Tandon 2020). Allein in der EU sind die jährlichen Treibhausgasemissionen durch fossile Energien um elf Prozent gefallen, mit einer besonders starken Absenkung in der ersten Aprilhälfte, in der in vielen Ländern Europas besonders strenge Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie galten (ebd.). Allerdings ist zu erwarten, dass die Treibhausgasemissionen im Zuge der wirtschaftlichen Erholung nach Bewältigung der Krise wieder steigen werden, wenngleich noch unklar ist, ob die Werte aus 2019 wieder erreicht oder in welchen Größenordnungen sie gar überstiegen werden. Indessen, so argumentieren die Forscherinnen und Forscher des Global Carbon Project, böte sich nun ein besonderes Zeitfenster, um Maßnahmen zur wirtschaftlichen Erholung gezielt auf Klimaschutz auszurichten (ebd.).

Dies trifft auch auf Investitionen in die Digitalisierung allgemein sowie digitale Infrastrukturen zu. Eine wichtige Rolle könnte dabei das Konjunkturprogramm der Bundesregierung spielen. Dieses sieht unter anderem 150 Millionen Euro für einen verbesserten Mobilfunkempfang entlang der deutschen Schienenwege vor sowie eine Milliarde Euro zur Unterstützung der Digitalisierung von Verwaltung und Wirtschaft (allen voran von kleinen und mittelständigen Unternehmen) (Braun 2020). Die bis 2025 geplanten Investitionen in dem Bereich der Künstlichen Intelligenz sollen von drei auf fünf Milliarden Euro erhöht werden. Das Smart-City-Programm soll fortgesetzt und um 500 Millionen Euro aufgestockt werden, um nur einige wenige der digitalisierungsbezogenen Eckpunkte des Konjunkturprogramms zu nennen. Eine explizite Verbindung der digital- und wirtschaftspolitischen Ziele des Konjunkturprogramms mit nachhaltigkeitspolitischen Zielen findet jedoch bisher nur in geringem Maße statt. Im Rahmen einer Studie hat daher das Öko-Institut zwei Maßnahmenvorschläge skizziert, die neben einer positiven konjunkturellen auch eine positive ökologische Bilanz aufweisen könnten (Schemmel und Schumacher 2020). Zum einen sollten bestehende Rechenzentren einem umfassenden „Effizienz-Update“ unterzogen und neue IT-Infrastrukturen unter Energie-Effizienzaspekten ausgebaut werden. So ließen sich essenzielle digitale Infrastrukturen klimafreundlicher modernisieren und ausbauen. Zum anderen könnte eine Konjunkturfördermaßnahme die Entwicklung besonders ressourceneffizienter Software fördern und damit den während der Pandemie steigenden Bedarf an Softwarelösungen und digitalen Dienstleistungen

aufgreifen und mit sozialen und ökologischen Belangen in Einklang bringen. Durch derartige Maßnahmenpakete und gezielte Investitionen könnte der Digitalisierungsschub der Corona-Pandemie für eine strategische Weichenstellung genutzt werden. Wird solch ein nachhaltigkeitsorientierter gestalterischer Ansatz konsequent umgesetzt, ließen sich auch die – bislang noch unzureichend erforschten – langfristigen Folgen des aktuellen Digitalisierungsschubs besser abschätzen und steuern.

3.2 Chancen der Digitalisierung für den Klimaschutz – Grundzüge in einzelnen Sektoren

Wie bereits eingangs beschrieben, wird seit einigen Jahren die hohe Bedeutung der Digitalisierung für den Umbau zentraler wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bereiche hin zu einer Klimaneutralität hervorgehoben. So werden digitale Technologien und Anwendungen, wie etwa Künstliche Intelligenz und das Internet der Dinge („Internet of things“ – IoT), häufig auch als Enabler der Energie- und der Verkehrswende angesehen. Im Rahmen einer kürzlich durchgeführten Kurzstudie wurde die einschlägige Literatur einer Querschnittsauswertung unterzogen. Danach liegen die größten Potenziale, durch digitale Technologien THG-Emissionen zu vermeiden, in den Sektoren Energie (Elektrizität und Wärme), Gebäude und Transport. Zudem werden auch in der landwirtschaftlichen und der industriellen Produktion relevante Potenziale gesehen, wobei diese bisher als weniger gut untersucht bewertet werden (Bieser et al. 2020).[2] Konkret lassen sich nach Ansicht der Autorin und der Autoren dieser Kurzstudie die wichtigsten Hebel digitaler Anwendungen zur Vermeidung von THG-Emissionen wie folgt zusammenfassen (ebd.):

- Reduktion der THG-Intensität des Personenverkehrs (z. B. durch Förderung öffentlicher Verkehrsmittel und intermodaler Mobilität sowie effizientere Motorsteuerung)
- Reduktion der Verkehrsleistung in Personenkilometern (z. B. durch virtuelle Mobilität oder intelligente Verkehrssteuerung) und Tonnenkilometern (z. B. durch Teilen von Logistikinfrastruktur, Erhöhung der Auslastung bestehender Kapazitäten und Reduktion von Leerfahrten)
- Vermeidung von unnötigem Heizen und Kühlen in Gebäuden durch automatisierte Gebäudeüberwachung und -steuerung
- Energetische Optimierung von Produktionsprozessen in Industrie und Landwirtschaft
- Steuerung der Energienachfrage zugunsten der Integration erneuerbarer Energiequellen (Laststeuerung)

In der hier vorliegenden Studie werden vergleichbar dazu Chancen und Ansatzpunkte der Digitalisierung für die Erreichung anspruchsvoller Klimaschutzziele in den Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Gebäude und Industrie untersucht. In der vorliegenden Studie wird jedoch weniger in die Breite gegangen, sondern der Ansatz verfolgt, für die ausgewählte Sektoren jeweils zwei Anwendungsbeispiele digitaler Technologien näher zu betrachten, um – wo das möglich ist - auf der Grundlage aktueller Forschungsergebnisse das Potenzial zur Vermeidung von Treibhausgasen in Deutschland konkret aufzuzeigen. Für die Auswahl der Technologien haben wir

[2] Einige der ausgewerteten Studien zu den Zusammenhängen und Potentialen von IKT und Nachhaltigkeit wurden von der Global e-Sustainability Initiative (GeSI) beauftragt und von Beratungsunternehmen (Accenture Strategy, BCG, Deloitte) ausgearbeitet. Mitglieder der GeSI sind neben führenden IKT-Unternehmen Verbände, Beratungsunternehmen sowie Nichtregierungsorganisationen.

uns gleichermaßen an der Datenverfügbarkeit und der aktuellen Diskussion und Bedeutung innerhalb des jeweiligen Sektors orientiert.

3.2.1 Digitalisierung der Energiewirtschaft

3.2.1.1 Virtuelle Kraftwerke

Angetrieben von den Klimaschutzzielen und dem Atomausstieg wandelt sich die deutsche Stromerzeugung von einem zentralen in ein dezentrales System. Anstatt weniger Großkraftwerke versorgen uns vermehrt zahlreiche kleinere Anlagen der erneuerbaren Stromerzeugung. Aufgrund der zunehmenden Stromeinspeisung volatiler Solar- und Windenergieanlagen wird die elektrische Stabilität – die Übereinstimmung von Stromerzeugung und -verbrauch zu jedem Zeitpunkt – zu einer großen Herausforderung. Gegenwärtig speisen viele Kleinkraftwerke ihre Energie unkoordiniert in das Stromnetz ein. Zudem erzeugt ein verändertes Verbrauchsverhalten, wie u.a. durch Elektrofahrzeuge oder durch Kundinnen und Kunden, die sowohl Strom produzieren als auch verbrauchen (sogenannte Prosumer), weitere neue Anforderungen. Zukünftig werden die Prognosen von Erzeugung und Verbrauch zu einer äußerst komplexen Managementaufgabe (PwC 2017).

Virtuelle Kraftwerke (VK), auch bezeichnet als Schwarmkraftwerk, Kombikraftwerk, Hybridkraftwerk oder DEA-Cluster (DEA = dezentrale Erzeugungs-Anlagen), sollen dabei helfen, den Steuer- und Regelaufwand im Stromnetz von vornherein zu verringern. Der VDE definiert ein VK folgendermaßen: „Ein virtuelles Kraftwerk ist ein Verbund verteilter Erzeuger, oft auch in Verbindung mit Speicher- und Lastmanagement, mit dem Ziel, Energie und Systemdienste in gleicher Qualität wie konventionelle Kraftwerke auf den Märkten anzubieten“ (Dürr und Heyne 2017). Digitale Technik ist für ein VK grundlegend. Anlagen eines VK müssen mit Fernwirktechnik und netzwerkfähigen Steuerungsmodulen für Erzeuger und Verbraucher ausgestattet sein. Die Betreiber der VK benötigten ein Leitsystem zum übergeordneten Energiemanagement und einer auf das jeweilige Geschäftsfeld angepassten Optimierungssoftware. Ferner bedarf es entsprechender Informations- und Kommunikationstechnik und Server zur Speicherung und Verarbeitung der Informationen. VK erheben Echtzeitdaten über die aktuellen Anlagenauslastungen und prognostizieren Spitzenlasten, auf deren Basis die dezentralen Anlagen im Portfolio geregelt werden. Eine solche Netzstruktur ist ein intelligentes Energieversorgungssystem und wird als “Smart Grid” bezeichnet (Schellong 2016).

Anlagen an verschiedenen Standorten, darunter Anlagen der erneuerbaren Stromerzeugung, werden in Form eines VK zentral gesteuert, wodurch sie im Markt wie ein großes Kraftwerk auftreten, dessen Leistungsabgabe leichter, als die jeder kleinen Einzelanlage angepasst werden kann. Das Konzept ermöglicht so kleinen Akteuren Zugang zu Märkten, die ihnen als Einzelakteur verschlossen blieben. Es bietet zudem die Möglichkeit der Optimierung vieler dezentralen Anlagen entsprechend externer Angebote auf dem Energiemarkt (Schellong 2016).

Damit wird die Integration von erneuerbaren Energien erleichtert, wodurch die CO_2-intensive fossile Erzeugung weiter zurückgefahren werden kann. Für die Vermarktung des erzeugten Stroms in VK bieten sich mehrere Geschäftsfelder, wie z.B. Energiehandel, Regelenergiemarkt, Direktvermarktung oder Systemdienstleistungen oder Kombinationen daraus an.

An Fallbespielen, wie den Next Kraftwerken, wird der Erfolg des Modells VK deutlich. Im Jahr 2020 vernetzte das in Köln ansässige Unternehmen Next Kraftwerke rund 10.000 Anlagen mit einer Gesamtleistung von circa 8,5 GW. Seit 2017 konnte die angebotene Leistung mehr als verdoppelt werden[3]. Auch insgesamt ist die Anzahl der VK mit den erneuerbaren Anlagen zur Stromerzeugung gewachsen. So hat sich die installierte Kapazität in der EU seit 2014 im Jahr 2019 auf 18 Gigawatt verdoppelt (IEA 2018).

Im Jahr 2019 entfielen in Deutschland 254 Mio. Tonnen CO_2e (BMU 2019) auf die Energiewirtschaft, das sind rund 32 Prozent aller Treibhausgasemissionen in Deutschland (Umweltbundesamt 2020b). Um das nationale THG-Minderungsziel des Sektors Energiewirtschaft bis 2030 gemäß Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes zu erreichen, müssen die Emissionen um 57 Prozent auf 108 Mio. Tonnen CO_2e gesenkt werden. Bis 2045 wird eine vollständige Klimaneutralität angestrebt. VK werden im Strom- und Wärmesektor eine tragende Rolle im Energiesystem der Zukunft und bei der Erreichung dieses Klimaziels einnehmen. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrsbereichs sind sie auch hier für die Zielerreichung relevant. VK sind ein wichtiges Bindeglied der Sektorenkopplung (Bauknecht et al. 2017).

VK können zu hohen Treibhausgas-Minderungseffekten beitragen. So können sie beispielsweise Größenordnungen erreichen, um mit Leistungen konventioneller Kraftwerke zu konkurrieren. Sie fördern den Ausbau von erneuerbaren Energien, denn VK stellen für kleine dezentrale Anlagen einen Anreiz zur aufwandsarmen aktiven Marktteilnahme und damit mehr Wirtschaftlichkeit dar. Minderungseffekte erzielen VK außerdem, weil sie in der Lage sind, Regelenergie[4] bereitzustellen. Das Angebot von Regelenergie in Märkten mit hohen EE-Anteilen ist entscheidend für Versorgungsstabilität. VK haben somit das Potential, die hier meist noch eingesetzten fossilen Energieträger zu ersetzen. Das Konzept VK mit zahlreichen dezentralen Anlagen, Verbrauchern und Speichern ist grundsätzlich hochflexibel. Sofern hierfür die entsprechenden Infrastrukturen zur Nutzung dieser Flexibilitäten bereitstehen, können sie zudem den Bedarf an weiterem Netzausbau verringern. Diese Minderungseffekte resultieren aus der wirtschaftlichen Integration von erneuerbaren Energien. Erzielt wird diese zum einen durch die bessere Abstimmung von Stromverbrauch und -erzeugung. Ein weiterer Faktor ist die Einbindung zusätzlicher Verbraucherinnen und Verbraucher im Wärme- oder Verkehrssektor und die dadurch mögliche Substitution bisher eingesetzter fossiler Brennstoffe (Elektromobilität, Power-to-Heat wie beispielsweise Wärmepumpen). Minderungseffekte resultieren außerdem durch die Nutzung von Speichern und ggf. die Optimierung von Eigenstromnutzung vor Ort. Eine konkrete Quantifizierung ist dabei voraussetzungsvoll und von der konkreten Konzeptionierung des VK abhängig.

Eine Potentialanalyse aus dem Jahr 2015 zur Einbindung eines virtuellen Kraftwerks im Landkreis Cochem-Zell soll beispielhaft VK-Minderungseffekte aufzeigen. Ziel des Landkreises ist eine Erhöhung des zeitsynchronen Deckungsanteils von erneuerbaren Energien. Im Jahr 2015 stand dem Stromverbrauch von ca. 295.015 MWh eine erneuerbare Erzeugung von ca. 491.550 MWh gegenüber, die bilanziell damit deutlich über dem Verbrauch lag. Dennoch betrug die zeitgleiche Deckung des Verbrauchs durch erneuerbare Erzeugung nur 66 Prozent, in der restlichen Zeit war entweder zu wenig oder zu viel Strom vorhanden. Dadurch wurden trotz der hohen EE-Anteile

[3] www.next-kraftwerke.de

[4] Die Regelenergie wird auch Regelleistung genannt und gleicht als Reserve Schwankungen im Stromnetz, genauer gesagt der Stromnetzfrequenz, aus. Beim Regelenergieeinsatz kann sowohl Strom in das Netz eingespeist als auch aus dem Netz entnommen werden (positive und negative Regelenergie). Es werden Primär-, Sekundär- und Minutenregelleistung unterschieden. Die Primärregelleistung muss innerhalb von 15 Sekunden, die Sekundärregelleistung innerhalb von 5 Minuten und die Minutenregelleistung innerhalb von 15 Minuten verfügbar sein. Ausgeschrieben wird die benötigte Regelleistung von den Übertragungsnetzbetreibern am Regelenergiemarkt.

insgesamt noch ca. 19.140 t CO_2/Jahr Emissionen verursacht. Anhand eines VK-Konzepts mit gezielter Flexibilisierung und der vollständigen erneuerbaren Deckung des Stromverbrauchs wurde ein Treibhausgasminderungspotential in Höhe von ca. 11.400 t CO_2 pro Jahr berechnet, das durch Substitution von Netzstrom entsteht (Simon et al. 2018b, 2018a).

3.2.1.2 Flexibilitätsplattformen

Die Kopplung von Stromerzeugung und -verbrauch erfolgt durch ein elektrisches Netz. In Deutschland unterscheidet man nach Spannungsebene zwischen Übertragungsnetz und Verteilnetznetz. Das Übertragungsnetz hat eine Spannungsebene von mindestens 220 kV und dient hauptsächlich dem Energietransport über weite Strecken. Das Verteilnetz umfasst alle darunter liegenden Spannungsebenen, dazu gehören Hochspannung (110 kV), Mittelspannung (10-30 kV) und Niederspannung 0,4 kV (Schermeyer 2018) und ermöglicht die Weiterverteilung der elektrischen Energie an die Endkunden. Zentrale Aufgabe der Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber ist der sichere und nachhaltige Betrieb der Netzinfrastruktur. Sie verantworten ihren jeweiligen Netzbereich und unterstützen sich bei Bedarf untereinander. In ihren Bereichen erbringen die Netzbetreiber die Systemdienstleistungen, wie Betriebsführung, Frequenzhaltung (nur Übertragungsnetzbetreiber), Spannungshaltung und Netzwiederaufbau (Winter 2018). Die Übertragungsnetzbetreiber verantworten für ihre Regelzone die Vermeidung großflächiger Netzausfälle und tragen damit Systemverantwortung. Diese tragen die Verteilnetzbetreiber so nicht, für sie gelten zwar auch wichtige Vorschriften der Systemverantwortung, aber nur für ihren Netzbereich (Hilpert 2019).

Während im „alten“ fossilen Stromsystem hauptsächlich Großkraftwerke am Übertragungsnetz angeschlossen und kaum Erzeugungsanlagen im Verteilnetz waren, sind im nun schon stark erneuerbar geprägten Energiesystem 95 Prozent der EE-Anlagen im Verteilnetz angeschlossen. Die Anforderungen an das Verteilnetz verändern sich dadurch, es ist aber noch nicht darauf ausgelegt. Es kommt zu zunehmenden Rückspeisungen aus den unterlagerten Verteilnetzebenen in die Übertragungsnetze. Diese Entwicklung erweitert insbesondere die Verteilungsfunktion der unteren Netzebenen um eine „einsammelnde“ Funktion (Ecofys und Fraunhofer IWES 2017). Hinzu kommen neue Verbraucherverhalten durch Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen etc. (Schermeyer 2018). Diese Änderungen verursachen in den Verteil- und Übertragungsnetzen häufiger Netzengpässe. Das bezeichnet die Überlastung von Betriebsmitteln, wie Stromleitungen oder Transformatoren, durch sich einstellende Stromflüsse. Auf Verteilnetzebene kann Entlastung durch die Abregelung erneuerbarer Einspeisung geschaffen werden, wodurch der Strom dann aber nicht genutzt werden kann. Die Herausforderung besteht dementsprechend darin, weniger abzuregeln und dafür vermehrt Flexibilitätsoptionen einzubeziehen. Zu diesen gehören die Steuerung erneuerbarer Erzeuger nach Marktpreissignalen, die Bereitstellung von Netzstabilität, sowie die Einbindung von Energiespeichern und Verbrauchern (auch aus den Bereichen Wärme und Verkehr).

Aktuelle Herausforderung Netzengpassmanagement

Im gegenwärtigen Strommarktdesign existiert eine Trennung von Markt und Netz. Akteure im Markt sind entweder Stromerzeuger, -lieferanten oder -verbraucher. Unter der Annahme der sogenannten engpassfreien „Kupferplatte“[5] erfolgt die Strompreisbildung ohne Berücksichtigung von Netzrestriktionen, während im Realbetrieb aber physikalisch bedingt Netzengpässe entstehen (Ecofys und Fraunhofer IWES 2017). Bei zu hohen Grenzwerten steuern die Netzbetreiber mit den Gegenmaßnahmen Redispatch und Einspeisemanagement (EinsMan), um die Betriebsmittel zu schützen und Systemsicherheit zu gewährleisten. Im Rahmen der gesetzlichen Rangfolge versucht der Übertragungsnetzbetreiber zuerst über Anpassungen der Fahrpläne konventioneller Kraftwerke – der sogenannte Redispatch - die Überlastung zu vermindern. Erst wenn diese Anpassungsmaßnahmen ausgeschöpft sind, dürfen die Netzbetreiber zuletzt auch die Einspeiseleistung von EE-Anlagen reduzieren – das sogenannte Einspeisemanagement. Beim Redispatch werden in der Regel Engpässe im Übertragungsnetz adressiert, indem ein oder mehrere Netzbetreiber den ursprünglichen im Markt festgelegten Kraftwerkseinsatz (Dispatch) anpassen. Mit dem Einspeisemanagement wird die Einspeiseleistung erneuerbarer Energie-Anlagen reduziert (geregelt im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) als auch im Gesetz für Erneuerbare Energien (EEG)).

Netzengpässe im Stromnetz können zeitlich oder lokal entstehen. Zeitliche Engpässe treten vor allem im Übertragungsnetz auf, wenn beispielsweise mehr Strom produziert als verbraucht wird (z.B. bei Starkwind). Solche Situationen lösen die Netzbetreiber, indem die Produktion reduziert oder der Verbrauch erhöht wird (Dürr und Heyne 2017; Goldkamp und Schallenberg 2017). Lokale Netzengpässe entstehen im Verteilnetz durch Distanzen zwischen Produktion und Verbrauch. Aufgrund von begrenzten Netzkapazitäten kann der erzeugte Strom nicht zum Abnehmer gelangen. Gegenwärtig führen lokale Engpässe oftmals zu Abregelungen von erneuerbaren Energieanlagen, weil andere Optionen fehlen. Neben den anlagenseitigen Eingriffen der Netzbetreiber erfordert die Vermeidung von Netzengpässen auch ihre frühzeitige Identifikation. Auf Ebene der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) sind diese Identifikationsprozesse europäisch harmonisiert. Das gilt auf der Hochspannungsebene auch für die Prozesse der Verteilnetzbetreiber. Auf den unteren Spannungsebenen hingegen gibt es wenig einheitliche Prozesse. In Zukunft sind Lösungen erforderlich, die eine Einbindung weiterer Netzbetreiber ermöglichen. Daher sollten die Rechte und Pflichten der Übertragungsnetzbetreiber auch für Verteilnetzbetreiber gelten und eine enge Kooperation zwischen ihnen gewährleistet sein (Dröschel und Horst 2019). Mit dem Redispatch 2.0[6] sollen auch erneuerbare Energie-Anlagen und KWK-Anlagen am Redispatch teilnehmen und ihre geplante Stromproduktion zur Vermeidung von Netzengpässen verschieben können müssen. Bisher können dies nur konventionelle Kraftwerke auf Anforderung der ÜNB umsetzen. Dabei werden neben den ÜNB zukünftig auch die Verteilnetzbetreiber (VNB) eine Rolle spielen. Betroffen sind alle VNB mit Erzeugungsanlagen ab 100 kW. Auch das bisherige Einspeisemanagement, das die Erzeugungsreduktion von EE und KWK bei Netzengpässen regelt, soll integriert werden. Das Redispatch 2.0 wird im Rahmen des 2019 beschlossenen Netzausbaubeschleunigungsgesetzes (NABEG) im Oktober 2021 eingeführt (BET 2021; Aengenvoort 2020).

[5] Mit dem Bild der Kupferplatte wird der Ausbau eines idealen Stromnetzes für verlustfreien und unbeschränkten Stromtransport beschrieben.

[6] Am 17. Mai 2019 ist das NABEG 2.0 (Netzausbaubeschleunigungsgesetz) in Kraft getreten. Hiermit beginnt die Umsetzungsphase des Redispatch 2.0 bei allen beteiligten Akteuren, die bis zum 01.Oktober 2021 abgeschlossen sein muss. Mit den neuen Regelungen wird ein Instrument der Übertragungsnetzbetreiber auch auf die Verteilnetzbetreiber übertragen. Umgesetzt wird dies über Anpassungen am EnWG.

Smart Markets

Mit Flexibilität wird die technische Fähigkeit einer Energieerzeugungsanlage oder eines Energieverbrauchers bezeichnet, ihre aktuelle oder prognostizierte Leistung zu verändern (Schermeyer 2018). Das Marktdesign für den Einsatz von Flexibilitäten der Netzbetreiber kann marktbasiert oder stärker reguliert gestaltet werden (Weyer und Müsgens 2020). Aktuell werden marktbasierte Konzepte entwickelt und weiter erforscht, mit deren Hilfe mit lokaler Flexibilität auf lokale Engpässe reagiert werden kann. Diskutiert werden u.a. Plattformkonzepte, auch bekannt unter den Begriffen regionalisierte Märkte (Flexibilitätsmärkte) oder Smart-Market-Modelle. Dahinter steht die Idee, dezentrale Flexibilität auf digitalen Plattformen (Flexibilitätsplattformen) markbasiert anzubieten, um damit lokal Netzengpässe zu verringern und die Abregelung der Einspeisung von Erneuerbare-Energie-Anlagen zu minimieren. Hierfür sind auf der Erzeugungs- und Nachfrageseite bestimmte technische Voraussetzungen erforderlich. Dazu gehört die Fähigkeit der Akteure, kurzfristig auf Preissignale zu reagieren, und mit Sensorik und Aktorik ausgestattete Anlagen, beispielsweise mit Steuerboxen und Smart Metern. Mit dem Rollout intelligenter Messsysteme (iMsys) werden zahlreiche Erzeuger und Verbraucher mit solchen Technologien ausgestattet (Springmann et al. 2020). Gleichzeitig müssen auch die Netze – vor allem die Verteilnetze – digital mit Sensorik als Grundlage einer nachfolgenden Echtzeitdatenauswertung ausgestattet werden. Mit einer solchen Infrastruktur können auch sehr kleine Akteure ihre Flexibilitäten anbieten (Goldkamp und Schallenberg 2017).

Im SINTEG Projekt C/sells[7] wird ein Konzept zur Nutzung von bestehender Flexibilität im Verteilnetz erarbeitet und erprobt. Flexibilitätsplattformen können einen Markt für Netzbetreiber und Flexibilitätsanbieter darstellen. Flexibilitätsanbieter stellen Angebote ein, Bedarfe seitens der Netzbetreiber werden mit Verortung des Engpasses eingestellt, die Plattform übernimmt dann das Matching. Der Abruf der Flexibilität darf dabei keine Auswirkungen auf andere Spannungsebenen haben (Springmann et al. 2020). Die Kosten solcher Konzepte orientieren sich an den derzeitigen Redispatch und Einspeisemanagementkosten, unter denen sie bleiben sollten. Insgesamt muss das Optimum zwischen Netzausbau und Netzengpassmanagement gefunden werden. Die Einführung von Smart-Markets bedarf Anpassungen im Bereich Strommarkt, wie beispielsweise die Bereitstellung regionaler Fahrpläne und Prognosen. Außerdem sind Anpassungen der Präqualifikation von Produkteigenschaften im Regelenergiemarkt sowie verbesserte Netzplanung auf Ebene der Verteilnetze erforderlich (Ecofys und Fraunhofer IWES 2017).

Während im Jahr 2013 aufgrund von Netzengpässen insgesamt 2.847 GWh Strom abgeregelt wurden, waren es im Jahr 2018 bereits 13.322 GWh; davon lagen 7.919 GWh bei den Übertragungsnetzbetreibern für Redispatch und 5.403 GWh betrafen das Einspeisemanagement. Aus den Angeboten marktbasierter netzdienlicher Flexibilitäten ergibt sich dann ein Beitrag zum Klimaschutz, wenn der nicht abgeregelte Strom aus erneuerbaren Energien oder KWK-Anlagen treibhausgasintensive Energieträger ersetzt. Das ist durch die Kopplung von Sektoren möglich, wenn z.B. zuschaltbare Lasten, wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge, zum Einsatz kommen, um eine Abregelung des erneuerbaren Stroms zu vermeiden (Weyer und Müsgens 2020). Gemäß einer Prognose (Özalay et al. 2019) für das Jahr 2035 könnte mittels Flexibilitätsnutzung eine EE-Energiemenge von 4.700 GWh[8] zusätzlich genutzt und nicht abgeregelt werden. Die Berechnung setzt neben flexiblen EE-Einspeisungen auch den flexiblen Einsatz von Lasten und Speichern

[7] Im Projekt C/sells wird ein intelligentes, dezentrales Energiesystem für Baden-Württemberg, Bayern und Hessen entwickelt, das zellulär, vielfältig und partizipativ angelegt sein soll. Eine besondere Bedeutung im Süden Deutschlands hat die Solarenergie. Denn knapp die Hälfte der gesamtdeutschen Photovoltaikleistung wird in dieser Region erbracht.

[8] In der zugrundeliegenden Prognose Özalay et al. 2019 wurde für das Jahr 2035 auf den bestätigten Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2030 (Version 2019) zurückgegriffen. Daraus wurde das Szenario B 2035 gewählt.

voraus. Im Jahr 2035 ließen sich so, unter Annahme des entsprechenden Strommixes, 1,5 Mio. Tonnen CO_2- Emissionen vermeiden (Wohlschlager et al. 2020).

3.2.2 Digitalisierung im Bereich Verkehr

3.2.2.1 Mobile Arbeit

Auf dem Verkehrssektor entfielen im Jahr 2019 163 Mio. Tonnen CO_2e, das sind 20 Prozent aller Treibhausgasemissionen in Deutschland (Umweltbundesamt 2020b). Gemäß Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes sollen die Emissionen bis 2030 auf 85 Mio. Tonnen CO_2e gesenkt werden. Das Thema Digitalisierung im Verkehrsbereich wird breit diskutiert und kann als ein Schlüsselfaktor zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele im Verkehrssektor angesehen werden. Neben Anwendungen digitaler Lösungen, die unmittelbar den Verkehrsfluss oder das Verkehrsverhalten adressieren, ergeben sich aus der digitalen Durchdringung des Alltags ebenfalls Einsparungspotenziale, die sich auf den Verkehrssektor auswirken können. Viel diskutiert wird dabei der Bereich der Telearbeit beziehungsweise mobilen Arbeit. Durch eine mögliche Verlagerung der Arbeit nach Hause mit Hilfe von IKT können tägliche Arbeitswege reduziert und verkehrsspezifische Treibhausgasemissionen eingespart werden. Eine Digitalisierung der Arbeitswelt könnte somit das individuelle Mobilitätsverhalten beeinflussen und die Verkehrsleistung, also die zurückgelegten Kilometer pro Person und Tag, langfristig reduzieren. Besonders relevant in der Diskussion sind dabei Berufsgruppen, bei denen ein hoher Einsatz von IKT flächendeckend möglich und bereits etabliert ist.

Die berufliche Mobilität, das heißt der tägliche zurückgelegte Weg von und zur Arbeit als auch Wege aus dienstlichen Zwecken, machen in Deutschland einen Großteil des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr aus. 2017 waren circa 16 Prozent der täglich zurückgelegten Wege Arbeitswege. Die Arbeit ist damit in Deutschland nach der Freizeit der zweithäufigste Wegezweck. Dies spiegelt sich ebenfalls im Anteil des Berufsverkehrs an der Verkehrsleistung wider. Rund 21 Prozent der Verkehrsleistung lässt sich auf den Berufsverkehr zurückführen. Werden Wege aus dienstlichen Zwecken berücksichtigt, macht der Anteil der beruflichen Mobilität an der Verkehrsleistung circa 38 Prozent aus (Nobis und Kuhnimhof 2018). Insbesondere Werktags verursacht die berufsbedingte Mobilität damit einen Großteil des Verkehrs in Deutschland.

Der Berufsverkehr wird dabei stark mit der Nutzung des privaten Pkw assoziiert. Überfüllte und dichte Straßen, besonders zu den Hauptverkehrszeiten, prägen das Verkehrsbild von Großstädten und Ballungsgebieten. Rund die Hälfte der Wege (49 Prozent), die mit dem Pkw stattfinden, erfolgen aus beruflichen und dienstlichen Gründen (Nobis und Kuhnimhof 2018). Rund 86 Prozent der Treibhausgasemissionen, die im Berufsverkehr ausgestoßen werden, werden durch den privaten Pkw emittiert (Büttner und Breitkreuz 2020). Die berufsbedingte Mobilität trägt damit wesentlich zur Klimabilanz des Personenverkehrs und des Verkehrssektors im Allgemeinen bei. Im Jahr 2017 betrugen die Emissionen auf Arbeitswegen ca. 25 Prozent der Gesamtemissionen des gesamten Sektors (Marc Schelewsky et al. 2020). Ein Wandel der beruflichen Mobilität ist daher ein wesentlicher Baustein einer erfolgreichen Verkehrs- und Energiewende.

Zwar ist auch beim Berufsverkehr seit Jahren eine Zunahme der Fahrradnutzung zu beobachten – zuletzt durch die Covid-19-Pandemie angeregt. Dennoch sind die im Durchschnitt längeren Wege des Berufsverkehrs, wie auch die Flexibilität und Privatheit, die ein Pkw verspricht, für einen Großteil der Arbeitnehmenden ein Grund für das Auto als Verkehrsmittel. In Deutschland liegt der Anteil des Pkw am Modal Split – das heißt die Verteilung der Verkehrsleistung auf die Verkehrsmittel – bei rund

76 Prozent im Berufsverkehr (Büttner und Breitkreuz 2020). Der ÖPNV mit einem Modal Split von 20 Prozent, das Fahrrad mit drei und der Fußverkehr mit rund einem Prozent haben hingegen eine eher untergeordnete Rolle. Das raumspezifisch unterschiedlich flächendeckende Angebot des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs trägt zusätzlich zur anhaltenden Dominanz des privaten Pkw im Berufsverkehr bei. Durch das Arbeiten von zu Hause könnte die Anzahl der Arbeitswege reduziert und der Verkehr punktuell entlastet werden. Insbesondere wenn Arbeitnehmende, die mit dem eigenen Pkw zur Arbeit fahren, vermehrt im Homeoffice arbeiten würden, könnte eine Hauptquelle für Emissionen im Berufsverkehr adressiert werden.

Um die Einsparungspotenziale gesamtheitlich abzuschätzen, muss in Bezug auf mobile Arbeit die Frage des Energieverbrauchs beleuchtet werden. Zwar nutzen Branchen, in denen eine breite Umsetzung von Homeoffice möglich ist, im Arbeitsalltag, das heißt am regulären Arbeitsplatz, bereits IKT. Dennoch ist die Frage zu stellen, wieviel Energieverbrauch bei der digitalen Arbeit anfällt und damit eingesparte verkehrsspezifischen Emissionen des Arbeitsweges somit möglicherweise ausgleicht. Neben dem spezifischen Energieverbrauch von IKT umfasst dies auch die Frage nach dem Strom- und Wärmebedarf am heimischen gegenüber dem regulären Arbeitsplatz, inklusive des Energieverbrauchs der verwendeten technischen Geräte, des Lichts oder für das Heizen. Selbst bei einem hohen Homeoffice-Anteil unter den Arbeitnehmenden eines Unternehmens oder einer Organisation würden Büroflächen kurz- und mittelfristig weiterhin Bestand haben und besetzt sein. Zu der Energiebilanz von mobiler Arbeit müsste somit zusätzlich zu dem – wenn wohlmöglich auch reduzierten – Energieverbrauch des regulären Arbeitsplatzes der (Mehr-)Energieverbrauch der privaten Haushalte hinzukommen.

Besonders der Datenverkehr könnte zudem eine kritische Größe sein: Videostreaming auf Plattformen, aber auch Video- und Telefonkonferenzdienste, wie Skype Business oder Zoom, machen mehr als die Hälfte des weltweiten Datenvolumens des Internets aus (Sandvine 2018). Das amerikanische IT-Unternehmen Cisco (2020) geht davon aus, dass durch das globale Streaming 200 Milliarden Kilowattstunden Strom pro Jahr anfallen. Auch wenn durch Homeoffice verkehrsspezifische Emissionen eingespart werden können, ist mobile Arbeit energieintensiv und energetische Rebound-Effekte müssen bei der Diskussion über die Emissionseinsparpotenziale daher mitberücksichtigt werden.

Eine Quantifizierung der möglichen Treibhausgasminderungspotenziale ist aufgrund der Komplexität allerdings nur eingeschränkt möglich. Bestehende Untersuchungen zu den möglichen Potenzialen hängen stark von den zugrundeliegenden Annahmen ab, wie beispielsweise dem Untersuchungsraum oder der Begriffsdefinition und -eingrenzung von mobiler Arbeit, und lassen sich daher schwer vergleichen oder zusammenfassen. Fall-spezifisch zeigen US-amerikanische Studien Einsparungspotenziale des Energieverbrauchs bis zu 14 Prozent (Hook et al. 2020). Für Deutschland haben (Büttner und Breitkreuz 2020) Treibhausgaseinsparungen von zwei bzw. drei Millionen Tonnen CO_2-Äquivalent pro Jahr bei einem Tag Homeoffice in der Woche und einem Homeoffice-Anteil der Gesamtbeschäftigung von 25 bzw. 40 Prozent ermittelt. Global liegen Schätzungen bei Einsparungspotenzialen bei rund 24 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalent pro Jahr, wenn 20 Prozent der weltweiten Arbeit von zu Hause aus erfolgen (IEA 2020a). Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der verkehrs- und energiespezifischen Schlüsselvariablen lassen sich valide Einschätzungen zu durchschnittlichen Einsparpotenzialen unter Berücksichtigung möglicher Rebound-Effekte nicht hinreichend treffen. Zu den relevanten Variablen gehören dabei das individuelle Mobilitätsverhalten der Arbeitnehmenden, die spezifische Raumstruktur der Wohnorte, der Energiemix der privaten Haushalte und regulären Büros sowie die bestehende digitale Infrastruktur

– von der Architektur der Rechenzentren, zur Wahl der Übertragungstechnik bis hin zu dem spezifischen Energieverbrauch und Ausstattung an Endgeräten.

Grundsätzlich zeigen bestehende Studien jedoch, dass mobile Arbeit zu einer Reduzierung der zurückgelegten Arbeitswege beitragen kann und dadurch die verkehrsspezifischen Emissionen eingespart werden können. Werden jedoch kurze Arbeitswege substituiert, die mit klimafreundlichen Fortbewegungsmitteln zurückgelegt werden, führt Homeoffice nicht zu einer CO_2-Entlastung. Nur wenn durch mobile Arbeit der Anteil emissionsintensiver Verkehrsmittel, wie dem privaten Pkw am Modal Split langfristig reduziert wird, kann mobile Arbeit zum Klimaschutz beitragen. Eine emissionsarme IT-Infrastruktur, inklusive entsprechender Übertragungswege und effizienterer Rechenzentren, kann den potenziellen Klimabeitrag stärken.

3.2.2.2 Platooning im Güterverkehr

Neben der Reduzierung der Verkehrsleistung, die zurückgelegten Kilometer pro Person und Tag, kann die Digitalisierung im Verkehrssektor auch dazu beitragen, den Verkehrsfluss effizienter zu gestalten, so dass Staus, die Anzahl der gefahrenen Umwege sowie Stop-and-Go Verkehr gerade auf der Straße reduziert und damit Kraftstoffe sowie Emissionen eingespart werden können. Daher adressiert eine Vielzahl digitaler Anwendungen die Optimierung des Verkehrsflusses.

Unter dem Stichwort „Konnektivität“ lassen sich die meisten Anwendungsfälle zusammenführen. Damit werden die Vernetzung und Kommunikation der Systeme miteinander und untereinander adressiert. Konnektivität geht dabei weit über Navigationssysteme hinaus. Aufgrund der Vernetzung des gesamten Verkehrsökosystems ist eine Echtzeitverkehrsplanung – von der Routenoptimierung bis zur Parkraumsuche – möglich. In Echtzeit können Informationen und Daten über das Verkehrsökosystem ausgewertet, übermittelt und andere Umweltinformation miteinbezogen werden. Anwendungsbeispiele von vernetzten Systemen finden sich in vielen Bereichen des Verkehrs. Im Güterstraßenverkehr werden miteinander vernetzte Lkw-Flotten als eine digitale Lösung für eine effizienteren Güterverkehr und Logistik gesehen. Auch wenn sich die derzeitige Realisierung in Deutschland auf Pilot- und Forschungsprojekte beziehen, wie das „Elektronische Deichsel – Digitale Innovation“ (EDDI) Projekt (2019).

Das sogenannte (Truck-) Platooning beschreibt die elektronische Vernetzung mehrere Lkws, die in Echtzeit miteinander kommunizieren. Einzelne Trucks schließen sich dabei zu einer eng gestaffelten Kolonne zusammen. Durch den Zusammenschluss agiert die gesamte Lkw-Flotte wie ein Fahrzeug (Platoon), da die Fahrweise des Führungsfahrzeugs auf die Nachfolgenden übertragen wird, das heißt Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Bremsmanöver (VDA 2020). Die Kommunikation der vernetzten Lkw-Flotte basiert auf der Vehicle-to-Vehicle (V2V) Kommunikation, bei dem die Fahrzeuge untereinander über automobiles WLAN (ITS-G5) Daten austauschen (BMVI 2018; ACEA 2017; MAN Gruppe 2020). Kameras, Sensoren, Radartechnologie, die die Umgebung scannen sowie Assistenzsysteme (z.B. Abstandsregelung, adaptive cruise control, etc.) optimieren die V2V Kommunikation. Darüber hinaus ist mit Blick auf die Weiterentwicklung vernetzter Systeme – die vollständige Automatisierung – die Kommunikation mit der umliegenden Infrastruktur (Vehicle-to-X Kommunikation), beispielsweise zwischen dem Verkehrsmittel und der Straße, eine weitere Grundvoraussetzung.

In der erprobten Umsetzung von Platooning, die bislang vorwiegend in den USA und Schweden erfolgt, sind zur Zeit allerdings nur teilautonome Lösungen relevant: Die Vernetzung teilautonomer Lkws zu einem Konvoi, bei dem im Idealfall nur das Führungsfahrzeug mit einem Fahrer besetzt ist oder die nachfolgenden Lkws teilautonom agieren. Durch die Konnektivität der Lkws sind geringere Abstände zwischen den Fahrzeugen möglich (Enzian und Brzoska 2019; ACEA 2017; MAN Gruppe 2020). Statt dem in Deutschland straßenverkehrsrechtlich vorgegebenen Abstand von 50 Metern können Abstände von vier bis 15 Metern erreicht werden (Lu und Shladover 2014; Fraedrich et al. 2017; Ramezani et al. 2018). Insbesondere aus der Reduzierung der Abstände ergeben sich Vorteile im Klimaschutz. Durch die verbesserte Aerodynamik können die Lkws im Windschatten voneinander fahren und so den Luftwiderstand verringern. Dadurch reduziert sich der Kraftstoffverbrauch und die Energieeffizienz wird optimiert.

Studien zeigen dabei eine Bandbreite von acht bis 18 Prozent weniger Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch, abhängig vom Abstand der Lkw zueinander und vom Fahrzeugdesign (Aerodynamik) (Janssen et al. 2015; Lu 2011; Tsugawa et al. 2016). Bei Überland- und Autobahnfahrten werden Rückgänge des Energieverbrauchs um fünf bis 20 Prozent für möglich gehalten (Wadud et al. 2016; Brown et al. 2014). Abseits der Theorie zeigen sich für Deutschland unter realen Gegebenheiten im Forschungsprojekt EDDI allerdings geringere Einsparungen von drei bis vier Prozent (Brandt et al. 2019). Dies wird auch darauf zurückgeführt, dass die in den Simulation erreichten Abstände zwischen den Lkws in der praktischen Umsetzung in Deutschland nicht mit der Straßenverkehrsordnung zu vereinbaren sind und somit weitere Abstände als technisch notwendig eingehalten werden müssen (Hartwig et al. 2020).

Grundsätzlich zeigt Platooning vor allem Potenziale in der Verbindung mit der Elektrifizierung der Lkw-Flotten (VDE Mobility 2020), da durch die Optimierung der Verkehrseffizienz höhere Reichweiten erreicht werden können. Der elektrische Antrieb ist im Vergleich mit weiteren verfügbaren Antriebskonzepten, wie Diesel, Liquefied Natural Gas (LNG) und Brennstoffzelle am effizientesten. Technologisch kann die Elektrifizierung in Verbindung mit einem Verbrennungsmotor (HEV oder PHEV) oder vollelektrisch (battery electric vehicle - BEV) umgesetzt werden. Beim BEV stellt dabei bisher die Weiterentwicklung des Energiespeichers (Batterie) eine große technische Herausforderung dar. Insbesondere im Straßengüterverkehr bei schweren Fahrzeugen und hohen Fahrleistungen haben die Batteriespeicher aktuell hohes Gewicht, Volumen und Investitionskosten. Neben der Energiedichte der Batterien ist die Dichte der Ladesäuleninfrastruktur entscheidend für den Erfolg. Alternativ kann eine dynamische Stromversorgung eine kontinuierliche Energiezufuhr bereitstellen (Electric Road System, ERS). Hierfür gibt es verschiedene Systeme, wovon das Oberleitungssystem technisch am ausgereiftesten ist. Oberleitungs-Lkw (O-Lkw[9]) können, für die Abschnitte ohne Oberleitung, in verschiedenen Hybridvarianten, mit verschiedenen Batteriegrößen (O-BEV[10]) oder mit Verbrennungsmotoren (O-HEV[11]) ausgelegt werden. Zur Nutzung von O-Lkw ist allerdings der Aufbau einer neuen Infrastruktur erforderlich. Für ein deutsches Endausbaunetz mit einer Länge von 4.000 km werden die Investitionskosten gegenwärtig auf bis zu 12,2 Mrd. Euro geschätzt. Aufgrund der hohen Dynamik bei der Batterieentwicklung ist der batterieelektrische Antrieb aber eine relevante Alternative. Beide Antriebe (O-Lkw und BEV) zeigen im Vergleich zu den Antriebsvarianten im Straßengüterverkehr (Diesel, LNG Brennstoffzelle) die höchsten Treibhausgasminderungspotentiale. Im Vergleich mit den heutigen Diesel-Fern-Lkw könnten O-Lkw unter Berücksichtigung des Kohleausstiegs die betriebsbedingten Treibhausgasemissionen bis

[9] Oberleitungs-Lkw (Oberbegriff für O-BEV und O-HEV)
[10] Oberleitungsgebundenes batterieelektrisches Fahrzeug
[11] Oberleitungsgebundenes Hybrid-Fahrzeug mit Verbrennungsmotor

2030 um 60 Prozent reduzieren. Rein batterieelektrische Lkw (BEV) könnten noch minimal höhere Emissionsminderungen im Betrieb erzielen, allerdings verbunden mit einem höheren fahrzeugseitigen Ressourcenbedarf und tendenziell höheren Emissionen in der Herstellungsphase (Hacker et al. 2020).

Im Vergleich zum Schienengüterverkehr und einer stärkeren Verlagerung der Transportleistung auf die Schiene, zeigt das Platooning mit Verbrennungstechnik jedoch eher geringere CO_2-Potenziale. Generell verursacht der Transport mit dem Lkw rund viermal so hohe CO_2-Emissionen im Vergleich zur Schiene (Rudolph et al. 2017). Auch wenn durch Platooning Einsparungen erreicht werden können, ist der fossile Straßengüterverkehr energie- und emissionsintensiver. Zudem können die Potentiale nur abgerufen werden, wenn ein hoher Vernetzungsgrad auf deutschen Autobahnen und Straßen herrscht und dadurch geringe Abstände möglich sind. Zudem sind durchschnittlich lange und gerade Strecken für das Platooning vorteilhaft. Sowohl vom rechtlichen Rahmen wie auch vom derzeitigen Straßennetz und der Infrastruktur zeigen sich in Deutschland derzeit eher geringere Vorteile. Für eine europäische Umsetzung braucht es zudem eine grenzüberschreitende sichere Datenübertragung.

Allerdings zeigen Wachstumsprognosen des Straßengüterverkehrs bis 2030 ein Wachstum von rund 38 Prozent. Damit wird der Lkw kurz- bis mittelfristig im Güterverkehr dominant bleiben (Allekotte et al. 2020). Ein Grund ist, dass sich nach Einschätzung des Verbands des deutschen Automobilindustrie (VDA) der Schienengüterverkehr erst ab einer Nutzlast von 300 Tonnen und ein kombinierter Güterverkehr, das heißt eine Kombination aus Schienen- und Straßenverkehr, erst ab 300 Kilometern wirtschaftlich rentieren (VDA 2016, 2020). Jedoch entfallen laut VDA rund 80 Prozent des Güteraufkommens auf Strecken unter 150 Kilometern, wodurch sich der Lkw aus ökonomischer Sicht für einen Großteil des Güteraufkommens unter den gegenwärtigen Bedingungen wettbewerbsfähiger gegenüber den Alternativen zeigt. Zudem weist der Schienengüterverkehr durch systembedingte Dispositionsprobleme oder technischen Inkompatibilitäten bei grenzüberschreitendem Schienengüterverkehr oftmals einen hohen administrativen Aufwand auf (FiS 2019). Ein weiterer Vorteil des Straßengüterverkehrs ist, dass bei der Umstellung auf Platooning bestehende Infrastrukturen genutzt werden können und damit vernetzte Lkw Flotten im Punkt Flexibilität und Erreichbarkeit die Vorteile des Straßengüterverkehrs gegenüber der Schiene weiterführen.

Für eine breite Umsetzung von Platooning in Deutschland braucht es eine sichere und flächendeckende Datenübertragung und auch die Frage nach „grüner IT“ muss hinreichend gestellt werden, da aufgrund der hohen Datenrate vernetzter Systeme ebenfalls Emissionen anfallen. Neben der passenden energieeffizienten Infrastruktur braucht es auch eine Novellierung der Straßenverkehrsordnung, die geringe Abstände zwischen den Lkws zulässt und damit Platooning in Deutschland rechtlich überhaupt erst ermöglicht. Für eine sichere Umsetzung bedarf es allerdings auch eines hohen Vernetzungsanteils anderer Verkehrsteilnehmer, und damit auch ein anderes Bewusstsein und Akzeptanz gegenüber vernetzten teil- sowie vollautonomen Systemen.

3.2.3 Digitalisierung im Bereich Gebäude

Der Gebäudesektor ist für 15 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich (rund 122 Mio. Tonnen CO_2e im Jahr 2019) (Umweltbundesamt 2020b). Bis 2030 sollen die gebäudebezogenen Treibhausgasemissionen gemäß Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes auf 67 Mio. Tonnen CO_2e reduziert werden. Zahlreiche Studien belegen, dass die Erreichung der im Klimaschutzgesetz verankerten klimapolitischen Ziele im Gebäudebereich mit

den derzeitigen Maßnahmen nicht erreicht (BMWi 2020b; Umweltbundesamt 2020a) werden können und dass erhebliche zusätzliche Anstrengungen notwendig sind. Dies beinhaltet u.a. eine deutliche Steigerung der Sanierungsrate sowie des Ambitionsniveaus energetischer Sanierungen (Sanierungstiefe) sowie den Umstieg auf CO_2-arme Energieträger.

Die Digitalisierung im Gebäudebereich bietet das Potenzial, auch kurzfristig deutliche Energieeinsparungen zu erzielen (BMWi 2017), indem der Energieverbrauch durch eine Optimierung der Heizungs- und Lüftungstechnik reduziert wird. Allerdings sind die Möglichkeiten der Digitalisierung im Gebäudesektor bisher kaum systematisch erfasst und spielen im Maßnahmenprogramm zur Erreichung der Klimaziele eine untergeordnete Rolle.

Digitale Technologien können bei der Transformation des Gebäudesektors sowohl in der Phase der Nutzung der Gebäude als auch beim Bau sowie der Sanierung eine Rolle spielen. In der Nutzungsphase können digitale Technologien zu einer Reduktion des Wärmeenergieverbrauchs beitragen, indem die Transparenz von Energieverbräuchen gesteigert wird und/oder Technologien zur Regelung und Steuerung von Heizungs- und Lüftungsanlagen zum Einsatz kommen. Beim Neubau und in der Sanierung können durch digitale Technologien Kosten gesenkt und damit höhere Sanierungsraten und -tiefen erzielt werden. Zudem kann eine qualitativ hochwertige Planung der energetischen Qualität des Gebäudes erreicht werden.

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden zwei zentrale Anwendungsfelder der Digitalisierung im Gebäudebereich näher beleuchtet: Digitale Anwendungen im Bereich der seriellen Sanierung sowie Smart-Home Technologien im Bereich der Heizungssteuerung und -regelung.

3.2.3.1 Digitale Technologien zur seriellen Sanierung

Die serielle Sanierung ist ein Konzept, bei dem die energetische Modernisierung von Gebäuden durch eine Vereinheitlichung von Prozessen in Planung, Produktion und Umsetzung sowie den Einsatz von moderner Digitaltechnologie und serieller Fertigungstechnik schneller, günstiger und mit weniger Arbeitsaufwand vor Ort erfolgt (Beckmann 2020).

Das Konzept der seriellen Sanierung wurde in den Niederlanden unter dem Namen „Energiesprong“ entwickelt, wo bereits 5.000 serielle Sanierungen durchgeführt wurden. Das Programm wird unter dem Namen Stroomversnelling[12] weitergeführt und eine Übertragbarkeit auf weitere Länder wird angestrebt.

In Deutschland wurde Anfang 2021 ein erstes Pilotprojekt nach dem Prinzip der seriellen Sanierung abgeschlossen (Modernisierung eines Wohnblocks in Hameln), eine weitere Verbreitung des Ansatzes wird durch verschiedene Initiativen und Förderprogramme unterstützt (z.B. dena[13], Förderung in Baden-Württemberg[14]). Im Jahr 2019 wurde der so genannte „Volume Deal“ erzielt, in dem 22 Wohnungsunternehmen die Absicht erklärten, in den kommenden Jahren insgesamt 11.635 Wohnungen seriell zu sanieren[15]. Auch für Deutschland wird erwartet, dass die serielle Sanierung ein hohes Potenzial zur Reduktion der Kosten für Sanierungen darstellt (Müller 2017). Durch eine Reduktion der Kosten können die Rate und Tiefe energetischer Sanierungen gesteigert werden und

[12] https://stroomversnelling.nl/
[13] https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/gebaeude/serielles-sanieren-von-mehrfamilienhaeusern/
[14] https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/informieren-beraten-foerdern/foerdermoeglichkeiten/foerderprogramm-serielle-sanierung-von-wohngebaeuden/
[15] https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/durchbruch-fuer-serielle-sanierung-von-wohngebaeuden/?type=90

somit zentrale Treiber für die Erreichung der THG-Minderungsziele im Gebäudesektor adressiert werden.

Digitale Technologien spielen beim Konzept der seriellen Sanierung in mehrfacher Hinsicht eine wichtige Rolle (Beckmann 2020):

- Digitale Abbildung des Gebäudes: Im ersten Schritt wird das zu sanierende Gebäude durch 3D-Laserscan-Technologie abgebildet. Die Technologie ermöglicht die Vermessung der Gebäude mit hoher Auflösung und vergleichsweise geringem Zeitaufwand. Bei Bedarf kann die Vermessung durch Luftaufnahmen mit Hilfe von Drohnen unterstützt werden.

- Planung: Die Daten aus dem vorherigen Arbeitsschritt werden verwendet, um eine digitale Planung der Sanierung mit Hilfe von Building Information Modelling (BIM) durchzuführen. BIM beschreibt einen softwarebasierten Ansatz zur Planung von Gebäuden und zur Umsetzung von Sanierungen, bei dem die relevanten Gebäudedaten digital erfasst, verarbeitet und visualisiert werden. Während BIM auch bei herkömmlichen Sanierungen sowie im Neubau zunehmend zum Einsatz kommt, ist eine digitale Planung bei seriellen Sanierungen eine notwendige Voraussetzung, da die vorgefertigten Elemente (industriell vorgefertigte Fassaden und Dächer) millimetergenau an das Objekt angepasst werden müssen.

- Modulare Vorfertigung: Die industrielle Vorfertigung von Bauteilen basierend auf Ansätzen aus der Fertigbaubranche ist ein Kernelement der seriellen Sanierung. Durch die Automatisierung und Skalierung der Fertigung unter Einbezug digitaler Technologien (Industrie 4.0) können potenziell erhebliche Kosteneinsparungen erreicht werden.

Zusätzliche Impulse für die Weiterentwicklung vorgefertigter Sanierungslösungen soll die vom BMWi angekündigte Anschubförderung „Serielle Sanierung“ geben, die in 2021 an den Start gehen soll. Das BMWi veranschlagt für dieses Förderprogramm eine zusätzliche Treibhausgasreduktion von 0,044 Mio. Tonnen CO_2e im Jahr 2030 (BMWi 2020b). Hierin sind lediglich die unmittelbar durch die Anschubfinanzierung geförderten Prototypen-Gebäude enthalten, nicht aber Folgeprojekte, die durch den avisierten neu entstehenden Markt aufgrund niedriger Baukosten möglich werden könnten. Gelingt es, auf Basis der Prototypen das Geschäftsmodell “Serielle Sanierung” zu etablieren und zu skalieren, könnten erhebliche THG-Einsparungen realisiert werden.

3.2.3.2 Smart Home im Bereich Heizungssteuerung

Der Begriff „Smart Home“ umfasst ein breites Spektrum an Produkten, die mithilfe von vernetzten Komponenten eine bedarfsgerechte Steuerung verschiedener Anwendungsbereiche, wie Beleuchtung, elektronische Geräte, Haushaltsgeräte, Alarmanlagen, Jalousien, Belüftung und Heizung ermöglichen. Der Markt für Smart Home Produkte ist in den letzten Jahren deutlich gewachsen, wobei der größte Anteil des Umsatzes auf die Bereiche der smarten Haushaltsgeräte, Gebäudesicherheit sowie Vernetzung und Steuerung fiel[16]. Der Bereich des Energiemanagements nimmt einen Anteil von etwa 15 Prozent am Umsatz im Smart Home Bereich ein.

Die vorliegende Studie fokussiert auf den Bereich der Smart Home Systeme, deren primärer Zweck die Reduzierung von Heizenergie durch automatische Steuerung von Heizungen und/oder Thermostaten ist. Dieser Bereich der Smart Home Technologien trägt am deutlichsten zur

[16] Statista (2020). https://de.statista.com/outlook/279/137/smart-home/deutschland#market-revenue

Reduzierung des Energieverbrauchs im Haushalt und somit zu der Verminderung von Treibhausgasemissionen bei (Quack et al. 2019).

Die Durchdringung von Smart-Home Technologien im Bereich der Heizung liegt derzeit bei etwa 15 Prozent der Haushalte (Bitkom e.V 2020). Für das Jahr 2018 wurde eine Durchdringung von 10 Prozent ermittelt (Deloitte 2018), wobei weitere 15 Prozent der Befragten angaben, die Anschaffung eines Smart-Home Geräts im Bereich Heizung im nächsten Jahr zu planen.

Bei der Betrachtung von digitalen Technologien zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs ist zu unterscheiden zwischen der Steuerung und Regelung am Wärmeerzeuger sowie der Steuerung und Regelung am Heizkörper (Thermostate).

Im Bereich der Steuerung und Regelung am Wärmeerzeuger ist es heute schon die Regel, dass Wärmeerzeuger sich dem tatsächlichen Heizbedarf anpassen, durch **Anpassung der Heizkurve** anhand der Außentemperatur (witterungsgeführt) oder der Innentemperatur (Raumthermostat). Letzteres ist beschränkt auf Wohnungen mit eigenem Wärmeerzeuger (z.B. Einfamilienhäuser oder Wohnungen mit eigener Etagenheizung), bei denen mit Hilfe eines **Raumthermostates,** das in einem Referenzraum angebracht wird, die Rautemperatur auf einem bestimmten Niveau gehalten wird. Die **smarte Variante der Raumthermostate** kann mit dem Internet verbunden werden, so dass der Nutzer per App direkt den Heizkessel ansteuern kann. So können z.B. verschiedene Heizprogramme gewählt und Zeitpläne verändert werden, auch Online-Dienste wie Wetterprognosen können eingebunden werden.

Im Bereich der Steuerung und Regelung am Heizkörper spielen digitale Thermostate eine große Rolle. Diese können unabhängig von der Wohnsituation (Einfamilienhaus, Mehrparteienhaus etc.) zum Einsatz kommen. Die herkömmliche Variante ist ein **digitales Heizkörperthermostat**, das ohne zusätzliches Equipment verwendet und direkt am Heizkörper eingestellt wird. Diese Art der digitalen Heizthermostate gibt es seit langer Zeit und in großer Vielzahl auf dem Markt und sie sind in allen größeren Elektronikmärkten oder im Internet erhältlich. Die Kosten liegen pro Thermostat und je nach Händler zwischen 10 – 40 €. Die Thermostate kommen mit vorprogrammierten Einstellungen wie einer Tag-/Nachtschaltung und können dem individuellen Nutzerverhalten angepasst werden. Viele haben zusätzlich integrierte Funktionen, wie eine Lüftungserkennung (drosselt Heizung bei offenem Fenster) oder Frostschutz. Die eigentliche „intelligente“ Heizungssteuerung beginnt, wenn die Thermostate über das Internet per App vom Nutzer eingestellt werden können. **Smarte Heizkörperthermostate** sind für etwa 50 – 80 € erhältlich und können untereinander vernetzt werden. Die Verbindung zum Internet ermöglicht zudem das Einbinden von Onlinediensten, wie z.B. einer Wetter-App oder Standortdiensten der Nutzer, über die erkannt wird ob dieser zu Hause oder unterwegs ist.

Laut einer Studie des Fraunhofer IBP kann der Heizenergiebedarf in Einfamilienhäusern/größeren Wohnungen bei einer Kombination von witterungsgeführter Regelung des Wärmeerzeugers und smarter Heizkörperthermostate mit Abwesenheitserkennung und Wetterprognose um 14 - 26 Prozent reduziert werden (Kersken et al. 2018). In einer Auswertung von fünf Simulationsstudienstudien in Einfamilienhäusern fand das Institut zudem einen Unterschied in den jährlichen Einsparungen nach Bewohneranzahl. Demnach führt eine Kombination aus gesteuertem Wärmeerzeuger und smarten Heizkörperthermostaten (mit Funktionen wie Rollladensensoren, Personenerkennung, Wetterdienst) in Singlehaushalten zu Einsparungen zwischen 1 - 36 Prozent, in Mehrpersonenhaushalten zwischen 1 – 9 Prozent (Kersken und Sinnesbichler 2013). Die erhebliche Spannbreite bei den Energieeinsparungen ist dadurch zu erklären, dass die zu erzielenden

Einsparungen stark abhängig sind vom Nutzerverhalten sowie von der energetischen Qualität der Gebäudehülle und des Heizungssystems.

Eine Studie, die im Auftrag der Verbraucherzentrale NRW durchgeführt wurde, untersucht das Einsparpotential digitaler Heizkörperthermostate durch automatische Tag-/Nacht-Absenkung. Zusätzlich wird ein Vergleich mit Haushalten gemacht, die neben der Tag-/Nacht-Absenkung ein Nutzerprofil/Zeitplan angeben, der den Heizbedarf tagsüber berücksichtigt. Die Simulation umfasst ein freistehendes Einfamilienhaus und eine Wohnung in einem Mehrfamilienhaus, in jeweils verschiedenen Bauklassen. In einem Jahr lässt sich durch konsequente Nachtabsenkung der Energiebedarf im Mehrfamilienhaus (Baustand nach 1995) um 2 - 6 Prozent und im Einfamilienhaus um 5 - 12 Prozent reduzieren. Die Tagabsenkung bringt bei häufiger Abwesenheit weitere 8 - 11 Prozent in Mehrfamilienhäusern, in Einfamilienhäusern sind die Einsparungen nur leicht höher. Eine Simulation zum Absenken bei offenem Fenster (mehr als 3 Stunden) brachte bis zu 13 Prozent Einsparungen (Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH 2016).

Eine Simulationsstudie des Öko-Instituts betrachtet verschiedene Szenarien von energiesparenden smarten Anwendungen, darunter eine Variante mit Heizungssteuerung (Kombination Heizkesselsteuerung/Heizkurveneinstellung) und Heizkörperthermostaten (Zeitpläne, Personenerkennung, Rollladensensoren, Fenster-/Türsensoren). Für Einfamilienhäuser/große Wohnungen wurde eine Ersparnis des Heizenergieverbrauchs zwischen 9 – 13 Prozent ermittelt (Quack et al. 2019).

Eine Studie der TH Köln stattete 120 Haushalte mit einem Smart-System aus und nahm die monatlichen Energie-/Wärmeverbräuche über 2 Jahre auf. Neben einem Heizungsthermostat und zugehörigen Fenster- und Türkontakt wurden andere smarte Geräte installiert, die nicht direkt mit der Heizung in Verbindung stehen (Bewegungsmelder, Rauchmelder, Zwischenstecker). Alle Haushalte hatten eine Erdgasheizung und konnten im Vergleich zu den Vorjahren bis zu 30 Prozent Heizenergie sparen. Die Studie weist aber auch auf den Mehrverbrauch mancher Nutzer hin, der z.T. durch höhere Nutzung der Heizung zustande kam (Rebound Effekt) (Schneiders et al. 2018). Da in der Studie kein Mittelwert der erzielten Einsparungen angegeben wird, sind die Ergebnisse nur eingeschränkt aussagekräftig.

Insgesamt lassen sich aus den betrachteten Studien folgende Erkenntnisse zu den THG-Minderungspotenzialen ableiten:

- Obgleich die erzielten Energieeinsparungen durch digitale Technologien eine große Bandbreite aufweisen, ist im Gesamtbild ein deutliches Einsparpotenzial zu erkennen. Wird beispielsweise eine zusätzliche Durchdringung der Technologien in 15 Prozent des Gebäudebestands sowie eine durchschnittliche Verbrauchsreduktion in diesen Gebäuden um 6 Prozent angenommen, könnten insgesamt jährlich ca. 1 Mio. Tonnen CO_2e eingespart werden.

- Im Unterschied zu Einsparpotenzialen durch energetische Sanierungen, die aufgrund der langen Investitionszyklen nur langfristig zu erschließen sind, sind die Potenziale durch digitale Technologien zur Heizungssteuerung auch kurzfristig zu erschließen.

- Aufgrund der im Vergleich zu energetischen Sanierungsmaßnahmen deutlich geringeren Kosten sind digitale Technologien zur Reduzierung der Energieverbrauchs eine niederschwellig umzusetzende Einsparoption. Auch im Bereich der Förderung digitaler Technologien ist aufgrund der geringen Kosten mit hohen Fördereffizienzen zu rechnen.

- Digitale Thermostate bieten Einsparpotenziale auch im Bereich von Mietwohnungen, bei denen die Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeinsparungen häufig durch das Mieter-Vermieter-Dilemma[17] erschwert wird.

- Um der unsicheren Datenlage bezügliche der zu erreichenden Einsparungen zu begegnen, sollte mit Hilfe eines kontinuierlichen Monitorings die Datenlage zu den Einsparpotenzialen verbessert werden.

Fazit und Einordnung der Einsparpotenziale im Gebäudesektor

Obgleich die Abschätzung der Einsparpotenziale mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist, lässt sich folgendes Fazit ableiten:

- Die Nutzung von digitalen Technologien für die serielle Sanierung mit industriell vorgefertigten Bauteilen kann potenziell einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Sanierungsrate und -tiefe liefern und somit mittel- bis langfristig deutliche Minderungen der CO_2-Emissionen erzielen. Aufgrund der langen Investitionszyklen im Gebäudebereich ist der Beitrag der seriellen Sanierung zur Erreichung der kurz- bis mittelfristigen Einsparziele bis 2030 allerdings eingeschränkt.

- Die Nutzung digitaler Technologien zur Steuerung und Regelung von Heizungstechnologien ist im Gegensatz dazu auch mit kurzfristigen Einsparpotenzialen verbunden. Die beispielhafte Betrachtung der jährlichen Einsparungen von ca. 1 Mio. Tonnen CO_2e bei einer zusätzlichen Durchdringung der Technologien in 15 Prozent des Gebäudebestands sowie einer durchschnittliche Verbrauchsreduktion in diesen Gebäuden um 6 Prozent zeigt, dass die Digitalisierung einen Beitrag zur Zielerreichung im Gebäudebereich leisten kann.

3.2.4 Digitalisierung im Bereich Industrie

Mit einem Anteil von 23 Prozent ist die Industrie derzeit der zweitgrößte Emittent von Treibhausgasen in Deutschland (188 Mio. Tonnen CO_2e in 2019) – gleich nach dem Energiesektor (Umweltbundesamt 2020b). Gemäß Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes sollen die Emissionen bis 2030 auf 118 Mio. Tonnen CO_2e reduziert werden. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden mit Blick auf die Energiewende zwei oft diskutierte Anwendungsfelder der Digitalisierung im Industriesektor näher betrachtet: Demand Side Management und Smart Manufacturing.

3.2.4.1 Demand Side Management Chemische Industrie

Unter **Lastmanagement** versteht man die Anpassung und Steuerung der Stromnachfrage durch das gezielte Ab- und Zuschalten von Lasten. Bisher geschieht das hauptsächlich aus betriebsinternen Gründen. So soll durch das Spitzenlastmanagement sichergestellt werden, dass die Stromabnahme aus dem Stromnetz aufgrund der Kosten oder wegen technischer Gründe ein bestimmtes Maximum nicht überschreitet. Mit **Demand Side Management** ist demgegenüber ein Lastmanagement gemeint, das aufgrund überbetrieblicher, energiewirtschaftlicher Notwendigkeiten durch netzseitige Anreize, wie z.B. Regelleistungsabrufe oder Preisspitzen am Stromspotmarkt durchgeführt wird.

[17] Das Mieter-Vermieter-Dilemma bezeichnet die Tatsache, dass bei Vermietern nur eingeschränkte finanzielle Anreize für energetische Modernisierungsmaßnahmen vorliegen, da die resultierenden Energieeinsparungen beim Mieter anfallen.

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung führt absehbar zu einer fundamental neuen Herausforderung für das Stromnetz. Während das bisherige Stromnetz darauf ausgerichtet war, dass die Nachfrage das Angebot bestimmt, ist das Angebot an erneuerbarem Strom abhängig von Wind und Sonne und damit unabhängig von der jeweiligen Nachfrage. Mit einem zunehmenden Anteil an fluktuierender und intermittierender Stromerzeugung wird die Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes, bei dem zu jedem Zeitpunkt Stromangebot und –nachfrage im Gleichgewicht sind, eine immer größere Herausforderung. Einen Beitrag zur Stabilisierung können sogenannte flexible Lasten leisten, also Stromverbraucher, die je nach Situation im Stromnetz unterschiedlich große Lasten abrufen können. Auch im konventionellen Stromnetz werden solche Funktionen benötigt und z. B. mittels Wasserpumpspeicherkraftwerken bereitgestellt, allerdings nimmt der Bedarf an flexiblen Lasten durch die steigenden Anteile erneuerbarer Stromerzeugung massiv zu.

In verschiedenen Studien, z. B. im Rahmen der dena-Netzstudie II (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2010), wurde gezeigt, dass prinzipiell in allen Sektoren technische Potenziale zur Laststeuerung vorhanden sind. Im Fokus stehen vor allem die Potenziale in der Industrie, da hier die größten Einzellasten vorhanden sind. Die Industrie verbraucht in Deutschland rund 40 Prozent des Stroms und ein Viertel der Wärme. Damit hat die Industrie durch digital gesteuertes Demand Side Management das Potenzial, Schwankungen im Stromnetz auszugleichen. Wenn weniger erneuerbarer Strom angeboten wird, kann die Industrie ihre Produktion drosseln, und umgekehrt kann die Produktion gesteigert werden, wenn mehr erneuerbarer Strom zur Verfügung steht. Somit kann die Spannung im Stromnetz auch bei schwankendem Angebot stabil gehalten werden. Die technische Machbarkeit einer solchen netzdienlichen Flexibilisierung wurde in mehreren Anwendungsbeispielen gezeigt.

Die chemische Industrie ist in Deutschland die Branche mit dem höchsten Energieverbrauch mit einem Anteil von 28,9 Prozent des industriellen Energieverbrauchs[18]. Der Strombedarf der chemischen Industrie liegt bei 54 TWh/a. An den Standorten der chemischen Industrie werden Kraft-Wärme gekoppelte Anlagen hauptsächlich zur Wärmebereitstellung betrieben, die rund 17 TWh/a Strom als Eigenerzeugung bereitstellen (Geres et al. 2019). Die integrierten Standorte der Chemiebranche eignen sich ganz besonders für Flexibilität durch die Konfiguration verschiedener, sektorübergreifenden Energieumwandlungstechnologien, die häufig aus anderen Gründen bereits am Standort vorhanden sind. Ziel des Angebots an Flexibilität ist eine verbesserte Einbindung der erneuerbaren Stromerzeugung, um die energiebedingten CO_2-Emissionen aus der konventionellen Energiebereitstellung zu senken.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“ wurden neben anderen Industriezweigen Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie untersucht (Ausfelder et al. 2019). Flexibilitätsoptionen, die sich hier als vielversprechend erwiesen haben, sind die Hybridisierung der Wärmeerzeugung, der Einsatz von thermischen Speichern sowie die Nutzung synthetischer Brenngase. Die Hybridisierung industrieller Wärmeerzeugung – die Möglichkeit Wärme zum einen mit elektrischen Verfahren, zum anderen über Brennstoffe bereitzustellen – kann einen signifikanten Beitrag zur Flexibilisierung der Stromnachfrage liefern. Elektrisch beheizte thermische Speicher ermöglichen einen Beitrag thermischer Prozesse zur Flexibilitätsbereitstellung durch eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung und -nutzung. Die größten Potenziale bestehen u. a. in der Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie. Zu den synthetischen

[18] destatis 2018, Pressemitteilung Nr. 426 des Statistischen Bundesamtes vom 2. November 2018. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_426_435.html

Brenngasen zählen elektrolytisch erzeugter Wasserstoff und synthetisches Methan. Die Nutzung solcher erneuerbaren Gase kann einen Beitrag zur Defossilisierung der Grundstoffindustrie leisten und hätte den Vorteil, dass die bestehenden Prozesse mit relativ geringen Änderungen weiter betrieben werden könnten. Wenn diese synthetischen Brenngase über Elektrolyse erzeugt werden, so stellt diese in Kombination mit einem Wasserstoffspeicher ebenfalls ein Flexibilitätspotenzial dar.

Ein routinemäßiger Wechsel zwischen strom- und gasbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen erfordert eine entsprechende Automatisierung der Abläufe. Eine Automatisierung erfordert zudem eine Festlegung von Steuerungsparametern, die zunächst entwickelt und getestet werden müssen. Prinzipiell wäre die Automatisierung eines flexiblen hybriden Betriebs rechnergestützt über digitale Expertensysteme möglich. Der Abgleich des Wärmeübertrags aus den Brennern und aus der elektrischen Zusatzheizung ist aufgrund unterschiedlicher Wirkungsgrade und Wärmeeintragsorte der Verfahren jedoch kompliziert. Für das Erstellen der Parameter eines Expertensystems würde deshalb digitale Messtechnik an verschiedenen Stellen des Prozesses benötigt, um die Auswirkungen verschiedener Fahrweisen zu erfassen.

Mittels Interviews mit Akteuren der Industrie wurden in SynErgie auch Herausforderungen und Hemmnisse untersucht und aufgezeigt. Bei der flexibilisierten Bereitstellung von Prozesswärme wurden hinsichtlich der möglichen Einbettung verschiedener Verfahren in die bestehenden Produktionsanlagen und Produktionsketten folgende Herausforderungen und Hemmnisse deutlich (Ausfelder et al. 2019):

Bestehende Produktionsanlagen wurden im Hinblick auf ein gewähltes Produktionsverfahren ausgestaltet, um die Herstellung einer bestimmten Menge Produkt in einer bestimmten Qualität zu ermöglichen. Im Zuge des Anlagendesigns wurden u.a. die Größe und Geometrie der Produktionsanlage sowie das gewählte (fossile) Erwärmungsverfahren eng aufeinander abgestimmt. Verschiedene strombasierte und fossil-befeuerte Erwärmungsverfahren unterscheiden sich u. a. bzgl. der erreichbaren Temperatur-Niveaus, der Wärmeübertragungswege sowie anderer charakteristischer Eigenschaften. Die Möglichkeit zur Nutzung eines elektrothermischen Erwärmungsverfahrens ist im Rahmen der bestehenden Anlagen aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der Erwärmungsverfahren nicht immer ohne weiteres gegeben. Elektro- und Elektroden-Kessel erzeugen zunächst Sattdampf. Eine weitere Nachverdichtung des Dampfs ist zwar technisch möglich, aber teuer und derzeit nicht üblich. Um die Kondensationsverluste möglichst gering zu halten, wird im Dampfnetz jedoch überhitzter Dampf benötigt. Um die gewünschte Dampfqualität im Dampfnetz zu gewährleisten, kann Sattdampf nur bis zu einer gewissen Menge (ca. 1/4 bis 1/3 des gesamten Dampfvolumens) und nicht zu konzentriert an nur einer bestimmten Stelle eingespeist werden. Elektro- und Elektroden-Kessel sind daher als Ergänzung, jedoch nicht ohne Weiteres als vollständiger Ersatz für Erdgaskessel, die überhitzten Dampf bereitstellen können, geeignet. Ein sehr schnelles Umschalten zwischen E-Kesseln und Gaskesseln, wie es z.B. für die Bereitstellung von Regelleistung erforderlich ist, induziert Druckschwankungen im Dampfnetz. Dies stellt eine Begrenzung für die Leistung dar, die flexibel zwischen den verschiedenen Dampfbereitstellungsanlagen umgeschaltet werden kann.

Für die Bereitstellung von Prozesswärme werden große Energiemengen benötigt. Da diese Energiemengen bislang über fossile Energieträger bereitgestellt werden, sind viele Standorte der energieintensiven Industrien (bisher) nicht darauf ausgelegt, entsprechend große Energiemengen in Form von Strom zu beziehen und an die Produktionsanlage weiterzuleiten. Um die großen benötigten Strommengen bereitzustellen, müsste daher die Strominfrastruktur vieler Standorte nachgerüstet werden. Je nach Lage der Standorte im Stromnetz könnte auch eine Nachrüstung der

vorgelagerten Verteilnetze erforderlich sein, bzw. müsste ein direkter Anschluss an eine höhere Netzebene in Erwägung gezogen werden.

Um Flexibilität im Alltagsbetrieb regelmäßig anzubieten, müssen innerbetriebliche Ablaufprotokolle und Entscheidungsbefugnisse definiert und standardisiert werden. Zudem ist – insbesondere für Flexibilitätsabrufe mit geringer Vorlaufzeit – eine Möglichkeit zur zentralen Steuerung der entsprechenden Anlagen sowie möglichst eine Automatisierung erforderlich. Bei einer Hybridisierung von Prozessen ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass ein flexibler Bezug von Strom bei gleichbleibendem Wärmeeintrag in den Produktionsprozess eine dem Strombezug gegenläufige Veränderung des Bezugs von Gas mit sich bringt, die ebenfalls organisatorisch abgebildet werden muss. Ein routinemäßiger und ggf. mehrmals pro Woche durchzuführender Wechsel zwischen strom- und gasbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen erfordert eine entsprechende Automatisierung der Abläufe. Hierfür sind nicht in allen Branchen in der Mehrheit der Betriebe die technischen Voraussetzungen bereits gegeben. Eine Automatisierung erfordert zudem eine Festlegung von Steuerungsparametern, die zunächst entwickelt und getestet werden müssen.

Investitionen in Anlagenteile, die nicht essenziell in den Produktionsprozess eingebunden oder auf andere Weise unverzichtbar sind, z. B. Investitionen in zusätzliche E-Kessel, sollen sich entsprechend der Finanzpraxis der Unternehmen innerhalb weniger Jahre rechnen. Entsprechend hoch müssten die Erlöse für die Bereitstellung von Flexibilität ausfallen, um eine Investition in eine Hybridisierung einer Anlage aus finanzieller Sicht und unter heutigen Randbedingungen attraktiv erscheinen zu lassen. Ein flexibler Betrieb einer hybriden Anlage impliziert, dass dafür sowohl Anlagenteile zur fossil-basierten sowie zur strombasierten Erwärmung benötigt werden, obwohl aus produktionstechnischer Sicht eine einzige Erwärmungsanlage ausreichend wäre. Bei einem flexiblen hybriden Betrieb sind beide Erwärmungsanlagen demnach jeweils nur zeitweise im Einsatz. Der resultierende, vergleichsweise geringe, Auslastungsgrad dieser Anlagenteile muss für einen wirtschaftlichen Betrieb durch Erlöse aus einer Vermarktung von Flexibilität kompensiert werden. Ein entsprechender business case ist nach Einschätzung der interviewten Akteure aus der Industrie zurzeit nicht ersichtlich.

Im Rahmen der Energiewende ändern sich die regulatorischen Rahmenbedingungen wie auch das Marktgeschehen in vergleichsweise kurzen Zeiträumen. Eine Absicherung zukünftiger Erlöse aus der Vermarktung von Flexibilität ist derzeit an den Strommärkten jedoch nicht möglich, da keine entsprechenden Produkte angeboten werden. Für Investitionen in eine Hybridisierung gibt es daher derzeit oftmals keine ausreichende Planungssicherheit. Dem gegenüber steht, dass Banken Sicherheiten einfordern, bevor sie Investitionen finanzieren.

Die Kosten zur Bereitstellung von Prozesswärme mit Strom sind im Vergleich zur Bereitstellung von Prozesswärme mittels fossiler Energieträger heutzutage sehr hoch. Als zentraler Grund wurde hierfür von einigen Interviewpartnern im Rahmen der SynErgie-Studie Aufschläge auf den Strompreis genannt, die unabhängig vom Börsenstrompreis pro bezogener kWh anfallen, z. B. die EEG-Umlage, die Netzentgelte sowie die Stromsteuer. Aufgrund der hohen Relevanz dieser Preisbestandteile für den vom Industriekunden zu entrichtenden Strompreis haben spezielle gesetzliche Regelungen zur möglichen Reduktion bestimmter Preisbestandteile für stromintensive Unternehmen eine hohe Relevanz. Eine Reduktion der EEG-Umlage für die elektrothermische Bereitstellung von Prozessdampf in einem Chemiepark ist nicht möglich. Die Betriebskosten für E-Kessel im Vergleich zu denen für Erdgas-Kessel werden als zentrales Hemmnis für einen weiteren Ausbau von E-Kesseln gesehen.

Als Fazit kann festgehalten werden: Die Umgestaltung des Strom- und Wärmemarktes auf erneuerbare Energien erfordert neben der geänderten Bereitstellung der Energie auch eine flexibilisierte Nutzung, die in einer gewissen Bandbreite auf das aktuelle Angebot an Energie im Markt reagieren kann. Der Industriesektor, insbesondere auch die Chemische Industrie, ist hier eine sehr relevante Größe. Für den flexiblen Verbrauch von Energie ist die Nutzung von digitalen Technologien essenziell. Die Flexibilisierung und damit die Nutzung digitaler Technologien ist eine wesentliche Voraussetzung für die Energiewende, allerdings lassen sich die Treibhausgaseinsparpotenziale nicht explizit auf diese digitalen Technologien herunterbrechen. Damit ist eine Quantifizierung der Einsparpotenziale durch die Digitalisierung im Rahmen eines Demand Side Managements in der Chemischen Industrie nicht möglich.

3.2.4.2 Smart Manufacturing

Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie (Plattform Industrie 4.0). Kennzeichnend für Industrie 4.0 sind im Wesentlichen zwei Entwicklungen: Vernetzung und Selbststeuerung. Vernetzte Systeme ermöglichen es, Daten und damit Informationen auszutauschen und somit intelligent aufeinander zu reagieren. Das Prinzip der Selbststeuerung steht im Gegensatz zu der bisherigen Zentralsteuerung von Maschinen: Bisher wurden Informationen in unterschiedlichen IT-Systemen gesammelt und von Menschen ausgewertet, die daraufhin Anpassungen vornahmen. Etwa um die Produktionsrate zu erhöhen oder effizienter Güter herzustellen. In der digitalisierten Zukunft werden alle Maschinen und die von ihnen produzierten Güter mit Sensoren ausgerüstet sein. Sie kommunizieren ständig und optimieren ihre Abläufe fortlaufend. Nicht nur untereinander, sondern mit anderen Systemen: Produktion, Vertrieb, Entwicklung, sogar Kunden und Lieferanten können in die vernetzte Welt eingebunden werden (Raveling 2020).

Eine **Smart Factory** umfasst entsprechend die Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Produktionsressourcen (Produktionsmaschinen, Robotern, Förder- und Lagersystemen, Betriebsmitteln) einschließlich der Planungs- und Steuerungssysteme.

Eine vernetzte und stark automatisierte Produktion im Sinne des Konzepts Industrie 4.0 (**Smart Manufacturing**) bietet die Möglichkeit, durch effizientere Prozesse und durch die Vermeidung und Verringerung von Verarbeitungsverlusten indirekt zum Klimaschutz beizutragen.

Im Rahmen einer Studie für das VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Schebek et al. 2017) wurden zehn Fallstudien für KMU in den vier Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Alle Unternehmen setzen Maßnahmen der digitalen Transformation ein, jedoch meist nicht primär mit dem Ziel, Ressourceneffizienz zu steigern, stattdessen werden sie häufig in Zusammenhang mit der Prozessautomatisierung realisiert. Digitale Technologien, die eingesetzt wurden, sind unter anderem

- Erfassung von Maschinen- und Prozessdaten in der Produktion
- Nutzen von digitalen Systemen in der Wertschöpfungskette
- Einsatz digitaler Technologien zur Prozessverbesserung
- Einsatz digitaler Technologien auf Ebene des Maschinen- und Anlagenmanagements

- Einsatz digitaler Technologien auf Ebene der Mitarbeiterunterstützung
- Einsatz digitaler Technologien auf Ebene des Produktionsmanagements

Die nachfolgenden Fallbeispiele stammen aus den Branchen Maschinenbau, Kunststoff- und Elektroindustrie (Schebek et al. 2017).

Maschinenbau

C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH: Der mittelständische Hersteller von Magnesiumdruckgussteilen hat ein Enterprise Resource Planning-System (ERP-System) über alle Produktionsprozesse eingeführt. Somit konnte der Materialumlauf, aber auch Ausschuss und Nacharbeit reduziert werden. Dadurch kann der Materialeinsatz von Magnesium sowie der Energiebedarf um jeweils bis zu 25 Prozent reduziert werden.

Mader GmbH & Co. KG: Der mittelständische Experte für Druckluft erweiterte sein Produktportfolio um die neue Druckluftleckage-App für mobile Endgeräte. Diese liefert in Echtzeit eine Gesamtübersicht über verursachte Verluste in Form von Energie und Kosten und verschafft somit den Kunden eine Transparenz über Druckluftleckagen. Dadurch konnten in der Fallstudie bis zu 50 Prozent der elektrischen Energie eingespart werden.

J. Schmalz GmbH: Der familiengeführte Weltmarktführer im Bereich Vakuum-Aufspanntechnik hat in einigen Montagebereichen die Produktion auf Einzelteilfertigung umgestellt. Dies führte u. a. zu einer nachhaltigen Steigerung der Materialeffizienz bei der Herstellung von hoch individualisierten Produkten in kleinen Losgrößen. Je nach Prozessschritt können zwischen 25 und 75 Prozent des Materialeinsatzes und bis zu 25 Prozent der Transportaufwendungen reduziert werden.

SMB Schwede Maschinenbau GmbH: Der Hersteller von Umreifungsmaschinen hat Produktentwicklung, Produktion und Service durch einen digitalen Produktzwilling optimiert.

Kunststoffindustrie

MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG: Der Hersteller von Rohrsystemen hat durch ein Informationsmanagementsystem die innerbetrieblichen Lagerhaltungsprozesse optimiert. Eine Quantifizierung der Einsparungen war im Rahmen der Studie nicht möglich.

Sanner GmbH: Das mittelständische Kunststoffunternehmen sieht die Potenziale der Digitalisierung und setzt bereits Maßnahmen der virtuellen Produktentwicklung zur schnellen Entwicklung von Prototypen ein. Das Unternehmen setzt außerdem auf die Nutzung von Cloud-Services zur Erhöhung der Ausfallsicherheit und besseren Kommunikation mit ausländischen Standorten. Eine Quantifizierung der Einsparungen war im Rahmen der Studie nicht möglich.

Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG: Das mittelständische Kunststoffunternehmen verlagerte die Produktentwicklung zum Kunden und schafft damit individualisierte Produkte zu geringen Kosten unter Einsparung von Ressourcen (z. B. Material für Prototypen). Voraussetzung dafür war die Virtualisierung der Produktentwicklung im Unternehmen bis hin zur Fertigung. Hierdurch konnten bis zu 25 Prozent des Materialinputs und bis zu 33 Prozent des Energiebedarfs eingespart werden.

Elektroindustrie

Sensitec GmbH: Der Hersteller von magnetoresistiven Sensoren hat durch die Erweiterung seiner Werkstückträger um digitale Datenspeicher eine papierlose Produktion umgesetzt. Hierdurch konnten bis zu 25 Prozent des Materialinputs und bis zu 20 Prozent des Energiebedarfs eingespart werden.

Hermos AG: Der mittelständische Automatisierungstechnikhersteller hat mittels eines Business-Warehouse-Systems, das eine durchgängige Datenintegration ermöglicht, die Planung und Durchführung des Wertschöpfungsprozesses digitalisiert und optimiert. Hierdurch konnten bis zu 25 Prozent des Materialinputs eingespart werden.

Als Fazit zur Nutzung digitaler Technologien im Rahmen eines Smart Manufacturings kann festgehalten werden, dass diese zu einer deutlichen Einsparung von Treibhausgasemissionen führen. Für einzelne Produktionsprozesse wurden Einsparpotenziale von bis zu 25 Prozent aufgezeigt. Eine Hochrechnung auf die gesamten Einsparpotenziale in der deutschen Industrie ist aus der vorliegenden Literatur nicht möglich, dazu sind die einzelnen Prozesse zu unterschiedlich und es ist unklar, wie groß die Potenziale einzelner Prozessoptimierungen bezogen auf die gesamte deutsche Industrie sind.

3.3 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden in vier Sektoren digitale Anwendungen beschrieben, die ein erhebliches Potenzial zur Verringerung von THG-Emissionen entfalten können. Dennoch muss festgestellt werden, dass die Treibhausgasminderungspotenziale in Deutschland durch Digitalisierung bislang noch nicht umfassend untersucht wurden. Trotz vieler Einzelstudien aus den unterschiedlichsten Bereichen besteht derzeit kein konsistentes Gesamtbild. Die Gründe dafür können wie folgt zusammengefasst werden:

- Nur in wenigen Studien wird offengelegt und nachvollziehbar dargestellt, ob und in welchem Umfang neben dem Nutzen digitaler Technologien für den Klimaschutz, beispielsweise durch die Verringerung des Energieverbrauchs, auch der anteilige Aufwand aus der Herstellung und Nutzung der erforderlichen IKT-Endgeräte und der IKT-Infrastruktur mit eingerechnet wurde.
- Viele Studien wurden unter der Zielsetzung der Identifikation und des Vergleichs von THG-Reduktionspotenzialen erstellt. Der in der Regel gewählte methodische Ansatz basiert auf der Identifikation von so genannten THG-Reduktionshebeln und einfachen Überschlagsrechnungen.
- Zudem muss berücksichtigt werden, dass Studienergebnisse zu den Minderungspotenzialen von Treibhausgasen nicht nur stark von Annahmen zur Marktdurchdringung der Technologien abhängig sind, sondern ebenso von den Annahmen des zugrunde gelegten Referenzszenarios; die hier angestellten Annahmen und Berechnungen sind in der Regel nicht transparent und überprüfbar ausgewiesen.

Bieser et al. empfehlen vor diesem Hintergrund, solche Studien nicht als Vorhersagen zu interpretieren, sondern als Quelle von Hinweisen, wie man Maßnahmen der Digitalisierung priorisieren, gestalten und umsetzen soll, um die THG-Reduktionspotenziale optimal auszuschöpfen. Zudem wird auf einige grundlegende Probleme hingewiesen, die generell mit der Identifikation und dem Vergleich von THG-Reduktionspotenzialen digitaler Anwendungen verbunden sind (Bieser et al. 2020):

- „Wie will man die zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen in einem Baseline-Szenario (auch „business-as-usual“- oder Referenzszenario) definieren, von der die geschätzten Reduktionspotenziale entscheidend abhängig sind?
- Wie geht man damit um, dass die Effekte selbst einzelner Anwendungsfälle eigentlich nur im gesamtwirtschaftlichen Systemzusammenhang abzuschätzen sind? Hierfür wäre eine dynamische Modellierung unter Berücksichtigung einer Vielzahl von sozioökonomischen Variablen notwendig.
- Die meisten Studien wählen systematisch Anwendungsfälle mit positivem THG-Reduktionspotenzial aus und vernachlässigen Anwendungsfälle mit Potenzial zur Erhöhung der THG-Emissionen.“ Dazu gehören beispielsweise Digitalanwendungen mit den Schwerpunkten Unterhaltung oder Komfortsteigerung.

Vor diesem Hintergrund sind neben einer noch verstärkten Begleitforschung auch Anstrengungen erforderlich, allgemein anerkannte Basisdaten für zentrale IKT-Produkte und -Dienstleistungen bereitzustellen und eine Verständigung auf grundlegende Bilanzierungsregeln für digitale Anwendungstechnologien herbeizuführen.

4 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der Digitalisierung

4.1 Überblick

Während im vorangegangenen Kapitel anhand von Anwendungsbeispielen für digitale Technologien in vier Sektoren mit Blick auf den Umwelt- und Klimaschutz positive Auswirkungen der Digitalisierung als indirekte Effekte im Sinne der Festlegung in Kapitel 1.3 behandelt wurden, zielt dieser Abschnitt darauf ab, einen Überblick zu den direkten Effekten, also zum Energieverbrauch und zu den klimarelevanten Emissionen zu geben, die mit der Einführung und Anwendung digitaler Technologien verbunden sind. Dazu werden Ergebnisse und Entwicklungen aus der Literatur dargestellt, die sich sowohl auf Deutschland und die nähere Zukunft als auch auf einen größeren geographischen und zeitlichen Kontext beziehen. Grundsätzlich werden in der Literatur bei den direkten Effekten sowohl die digitalen Endgeräte in Haushalten und Unternehmen als auch die digitalen Infrastrukturen wie Rechenzentren und Telekommunikationsnetze (Festnetze und Mobilfunknetze) betrachtet. Allerdings wird ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Quellen dadurch erschwert, dass in den einschlägigen Studien unterschiedliche Systemgrenzen hinsichtlich berücksichtigter Geräte und Lebenszyklusphasen gezogen werden und unterschiedliche Abgrenzungen erfolgen. So werden beispielsweise Geräte der Unterhaltungselektronik in einigen Studien unter IKT-Geräten subsumiert, in anderen erfolgt eine Abgrenzung zwischen IKT und Entertainment und Medien (E&M) (Bieser et al. 2020).

Angesichts dieser Situation werden bei den nachfolgend dargestellten und diskutierten Ergebnissen auch jeweils Angaben zum Untersuchungsrahmen gegeben, um die Einordnung in den Gesamtkontext zu gewährleisten. Ein in sich konsistentes Gesamtbild lässt sich allerdings beim gegenwärtigen Stand der Literatur und im Rahmen der vorliegenden Studie nicht zeichnen.

4.2 Strombedarf der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in Deutschland

Eine methodisch sehr fundierte und von der Datengrundlage breit angelegte Studie haben Ende 2015 Stobbe et al. mit ihrer Untersuchung zum Strombedarf der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in Deutschland vorgelegt (Stobbe et al. 2015). Die Studie umfasst die Bestandsaufnahme des Status quo mit dem Bezugsjahr 2015 und eine Prognose der weiteren Entwicklung des Energiebedarfs der IKT zum Bezugsjahr 2025. Vergleichbar zu zwei analog angelegten Vorläuferstudien aus den Jahren 2003 und 2009 verfolgt die Studie das Ziel, eine solide Faktenlage zu schaffen, auf deren Basis aktionsorientierte Empfehlungen formuliert werden können.

Im Unterschied zu anderen Studien (s.u.) ist der Untersuchungsrahmen bei Stobbe et al. sehr breit angelegt[19]; in der Modellierung werden folgende übergeordnete IKT-Bereiche unterschieden:

- Rechenzentren einschließlich Server, Storage und Netzwerktechnik und wesentliche Bestandteile der standortbezogenen Infrastrukturtechnik wie unterbrechungsfreie Stromversorgung, Kühl- und Klimatisierungssysteme.

[19] Ausgeschlossen sind der Behördenfunk und das Verwaltungskommunikationsnetz, Medizintechnik, Fahrzeugtechnik, Militärtechnik, Logistiktechnik, Verkehrsleittechnik sowie Maschinen- und Anlagentechnik – darunter also auch Bereiche, die mit Blick auf die Chancenwahrnehmung der Digitalisierung eine wichtige und zukünftig noch zunehmende Rolle spielen, vgl. Abschnitt 3.2 dieser Studie.

- Telekommunikation einschließlich (alter) PSTN Telefonvermittlungstechnik, digitalem Mobilfunk- und Kabelzugang, Aggregations- und Kernnetzen sowie die wesentlichen zugehörigen Bestandteile der Infrastrukturtechnik.
- Arbeitsplatz einschließlich mobiler Endgeräte, Personal Computer, Thin Clients, Displays, lokale Speicher, Kopierer und Drucker, Telefon- und Netzwerktechnik in Büros und im erweiterten Arbeitsumfeld.
- Haushalte einschließlich mobiler Endgeräte, Personal Computer, Spielekonsolen, Displays, Fernseher, ebenso digitale Audio- und Videotechniken, etc.
- Öffentlichkeit einschließlich digitaler Beschilderung und Videowände (Signage), Geld- und Ticketautomaten, öffentliche Internetzugänge, etc.
- Gebäudeversorgung einschließlich digitaler Mess- und Steuertechniken (Monitoring / Metering / Control) im Bereich der Versorgung mit Strom, Wasser, Wärme und Gase.

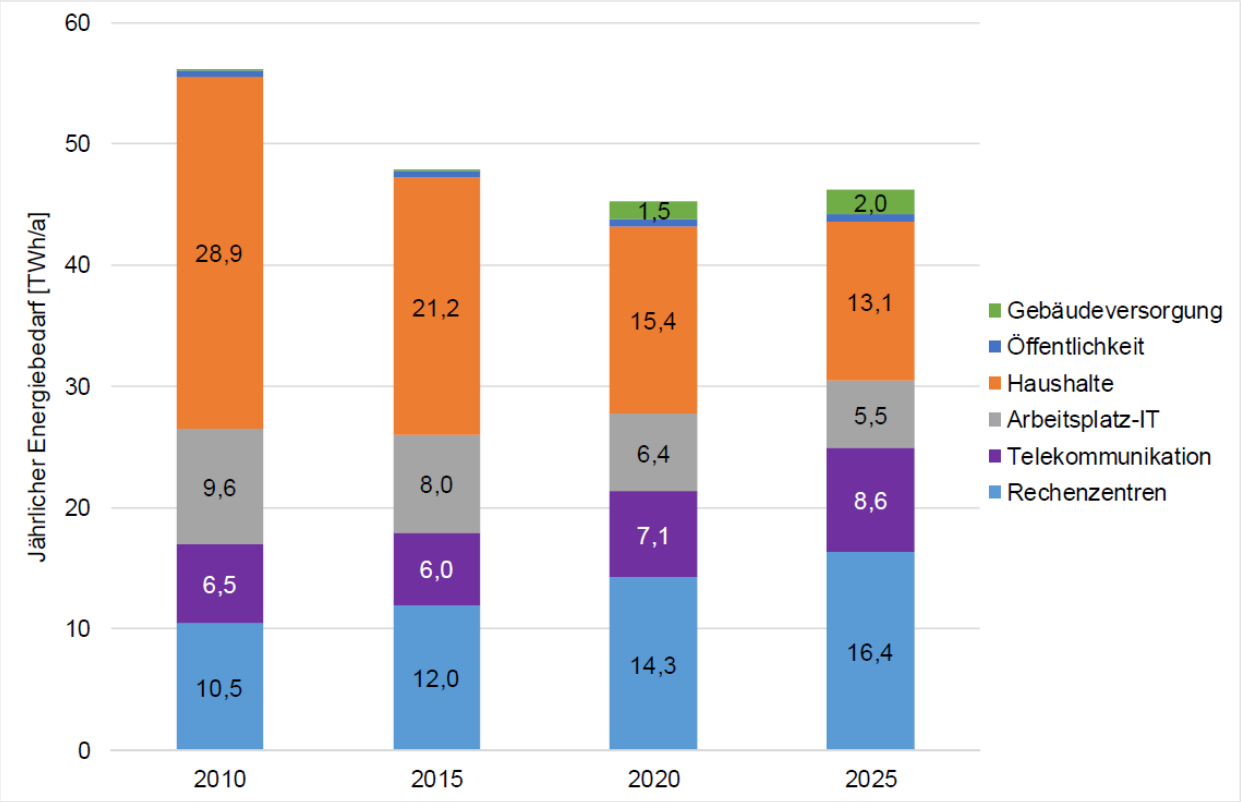
Das von Stobbe et al. auf der Grundlage von Modellen aus Vorgängerstudien weiterentwickelte Berechnungsmodell basiert auf einer strukturierten und weitgehend quantitativen Erfassung des IKT-Gerätebestandes in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Darin werden den IKT-Geräten energieverbrauchsrelevante Technik- und Nutzungsparameter zugeordnet und die daraus resultierende elektrische Leistungsaufnahme als Endenergiebedarf berechnet. Das Berechnungsmodell beinhaltet vier Basisparameter:

- Art und Anzahl des Gerätebestandes (Produktgruppe).
- Lastabhängige elektrische Leistungsaufnahme (Technikparameter).
- Nutzerspezifische Anwendungen bzw. Lastprofile (Nutzungsparameter).
- Interaktion im Netzwerk bzw. mit anderen Geräten (Datenverkehr).

Das Kernergebnis der Studie, also die Prognose des IKT-bedingten Energiebedarfs für Deutschland bis zum Jahr 2025 mit einer Aufschlüsselung wesentlicher IKT-Anwendungsbereiche ist in Abbildung 3 dargestellt. Danach ist der jährliche Strombedarf der IKT im Zeitraum von 2010 bis 2015 von 56,0 TWh auf 47,8 TWh um etwa 15 Prozent gesunken. Dieser abnehmende Trend wird sich mittelfristig bis zum Jahr 2020 noch fortsetzen und dann von 45,2 TWh leicht auf 46,2 TWh in 2025 ansteigen. Aus Sicht der Autoren zeichnet sich grundsätzlich eine positive Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs ab, wobei dies maßgeblich auf die technische Optimierung von IKT-Endgeräten, und hier insbesondere auf die deutliche Reduktion der Leistungsaufnahme bei Fernsehern, Monitoren und Computern zurückgeführt wird. Ein weiterer Beitrag zur Einsparung des Strombedarfs wird auf die intensivere Nutzung energiesparenderer, konvergenter und mobiler Produkte wie Notebooks, Tablets und insbesondere Smartphones anstelle von Desktop PCs und anderen Geräten zurückgeführt. Dadurch benötigen IKT-Endgeräte in Summe im Jahr 2025 fast 10 TWh weniger elektrische Energie als noch im Jahr 2010 (Stobbe et al. 2015). Als relevantes politisches Instrument zur Förderung dieser Entwicklung sehen die Autoren die sukzessive Regulierung von Produkteigenschaften im Rahmen der Europäischen Ökodesign-Richtlinie sowie dem Europäischen Energielabel seit 2008 an. Neben einer produktübergreifenden Regulierung der elektrischen Leistungsaufnahme im Standby-Zustand wurden mit dem Energielabel insbesondere

bei den Fernsehern rechtzeitig Anreize zur schnellen Einführung modernster LED-Technik geschaffen.

Abbildung 3: Elektrischer Jahresenergiebedarf der IKT in Deutschland 2010 – 2025 (Basisprognose)



Quelle: (Stobbe et al. 2015)

Rechenzentren und Telekommunikationsnetze werden nach Stobbe et al. im Jahr 2025 mit zusammen 25 TWh gut die Hälfte des gesamten IKT-bedingten Strombedarfs ausmachen, wobei bei dieser Prognose angenommen wird, dass der technische Fortschritt auch weiterhin in regelmäßigen Abständen eine Leistungsverbesserung auf Komponentenebene generiert, schrittweise das Power Management weiterentwickelt und damit auch softwareseitig die Energieeffizienz verbessert wird. Zudem wird auch unterstellt, dass Energiewandlungsverluste minimiert werden können, wodurch sich der Energiebedarf zur Klimatisierung in Rechenzentren ebenfalls reduziert. Treiber dieser Entwicklung ist primär eine intensivere Internetnutzung, wobei gerade das Streaming von hochauflösenden Videos zu steigenden Datenvolumen führt, deren Bereitstellung insbesondere zu Spitzenzeiten am Abend technisch abgesichert werden muss (Stobbe et al. 2015). Als weiterer Treiber der Entwicklung eines steigenden Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze und Rechenzentren wird das Internet der Dinge angesehen. Durch die Vernetzung von Maschinen, Fahrzeugen, Elektrogeräten und Gebäudetechnik steigt die Anzahl der netzwerkfähigen Objekte, d.h. Sensoren, Steuerelemente und Anzeigesysteme deutlich an und der Netzwerkbedarf erhöht sich allein durch die Anbindung dieser Objekte, da relativ unabhängig von der spezifischen Nutzung, der Signalisierungsaufwand in den IKT-Infrastruktursystemen zu Datenverkehr führt (ebd.).

Mit Blick auf die Interpretation der Ergebnisse im Kontext anderer Untersuchungen muss beachtet werden, dass sich die sehr ausführliche Arbeit ausschließlich auf den Energiebedarf in der Nutzungsphase bezieht, d.h. der nicht unerhebliche Energie- (und auch Ressourcenverbrauch) aus der Herstellung der IKT-Endgeräte und der IKT-Infrastruktur wird in der Studie von Stobbe et al. nicht abgebildet. Ferner wird die Prognose in Fachkreisen auf Grund der dynamischen Entwicklung des IKT-Sektors inzwischen als überholt angesehen, weshalb nachfolgend auf die Ergebnisse einer aktuelleren Kurzstudie eingegangen wird.

4.3 Direkte Effekte digitaler Technologien auf den Klimaschutz

Bieser et al. gehen in ihrer 2020 veröffentlichten Studie für den Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) davon aus, dass mit Blick auf die bisherige Studienlage zwischen 1,8 und 3,2 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 direkt auf Informations- und Kommunikationstechnologien zurückzuführen sind (Bieser et al. 2020). In die Auswertung wurden acht international ausgerichtete Studien aufgenommen, wobei drei Auswahlkriterien herangezogen wurden (ebd., Seite 12):

- Zum einen sollten die Studien möglichst umfassend alle direkten Effekte der Digitalisierung betrachten, also sowohl die Endgeräte als auch Rechenzentren und Telekommunikationsnetze.
- Zum anderen sollten die in den Studien vorgenommenen Modellannahmen möglichst transparent sein, um die verschiedenen Berechnungsansätze und -ergebnisse besser vergleichen zu können.
- Schließlich wurden die Studien so ausgewählt, dass die Ergebnisse möglichst die ganze Bandbreite der direkten THG-Emissionen der Digitalisierung widerspiegeln.

Nachfolgend werden die Kernergebnisse aus der Kurzstudie mit Blick auf die wesentlichen Teilbereiche der Digitalisierung zusammengefasst (Bieser et al. 2020):

- Bezogen auf die **Rechenzentren** wird konstatiert, dass in der Literatur kein einheitliches Meinungsbild und auch keine belastbaren Berechnungsergebnisse zum Energiebedarf und zu den THG-Emissionen der Rechenzentren vorliegt. Ausgehend von einem als wahrscheinlich angenommenen moderaten Anstieg der THG-Emissionen in den vergangenen 10 Jahren wird eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der Rechenzentren im Jahr 2020 von 200 bis 250 Mio. Tonnen CO_2e (inklusive Herstellung mit einem Anteil von rund 10 Prozent) als plausibel angesehen.
- Auch bei den **Telekommunikationsnetzen** liegen die in den ausgewerteten Studien errechneten Energiebedarfe und THG-Emissionen weit auseinander. Die Autoren gehen davon aus, dass der Energiebedarf und die THG-Emissionen in den vergangenen Jahren moderat angestiegen sind und auch in Zukunft ansteigen werden. Analog zur Einschätzung für die Rechenzentren wird für das Jahr 2020 eine Größenordnung von 200 bis 250 Mio. Tonnen CO_2e inklusive der Herstellung der Geräte und Anlagen als plausibel angesehen, wobei sich die Emissionen je etwa hälftig auf das Mobilfunknetz und das Festnetz aufteilen.
- Bei den **Endgeräten** sind die Ergebnisse aus der ausgewerteten Literatur konsistenter, Unterschiede hängen im Wesentlichen davon ab, ob nur die reinen IKT-Geräte wie Desktop Computer, Notebooks, Tablets und Smartphone oder zusätzlich auch Geräte der Unterhaltungselektronik (TV-Geräte, Settop-Boxen, etc.) berücksichtigt wurden. Im Unterschied zu Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen liegt der Anteil der THG-Emissionen aus der

Herstellung und dem Transport von IKT-Endgeräten (abhängig vom Gerätetyp) oft bei über 50 Prozent der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Mit zunehmender Energieeffizienz in der Nutzung, steigenden Gerätezahlen und einer Zunahme der Komplexität in der Herstellung wird angenommen, dass dieser Anteil noch weiter ansteigt. Aus Sicht der Autoren erscheint für das Jahr 2020 eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der IKT- und Unterhaltungselektronik-Endgeräte von etwa 900 bis 1.100 Mio. Tonnen CO_2e (ohne Unterhaltungselektronik: 500 bis 600 Mio. Tonnen CO_2e) als plausibel.

Zusammenfassend liegen auf der Grundlage der Querschnittsauswertung für das Jahr 2020 die weltweiten THG-Emissionen der IKT zwischen etwa 700 Mio. Tonnen CO_2e und 2.000 Mio.Tonnen CO_2e, was einem Anteil von zwischen etwa 1,5 und 4 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen entspricht, wobei aus Sicht der Autoren ein Anteil von 1,8 bis 3,2 Prozent als wahrscheinlich eingeschätzt wird. Zur unteren Abschätzung gelangt man mit oben aufgeführten unteren Grenzen der als realistische angesehenen Spannweiten für die THG-Emissionen und ohne Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik. Die obere Abschätzung ergibt sich mit den oberen Grenzen der Spannweiten und mit Berücksichtigung der Unterhaltungselektronik.

Aus den Erkenntnissen der Querschnittsauswertung von Bieser et al. und des in Abschnitt 4.2 dargestellten Strombedarfs der IKT (Stobbe et al. 2015) lassen sich näherungsweise die THG-Emissionen durch die Digitalisierung in Deutschland berechnen, vgl. die nachfolgende Tabelle 5.

Tabelle 5: Abschätzung der direkten THG-Emissionen in Deutschland durch die Digitalisierung

	2020				2025			
	End-geräte	RZ	Telek.-netze	Ges.	End-geräte	RZ	Telek.-netze	Ges.
Strombedarf [TWh/a]	23,8	14,3	7,1	45,2	21,2	16,4	8,6	46,2
THG – Herstellung [Mio. t CO_2e / a]	11,3	0,8	0,4	12,4	10,1	0,9	0,5	11,4
THG – Nutzung [Mio. t CO_2e / a]	11,1	6,7	3,3	21,2	9,9	7,7	4,0	21,6
THG – gesamt [Mio. t CO_2e / a]	22,4	7,4	3,7	33,6	20,0	8,5	4,5	33,0

Quelle: Eigene Berechnungen nach Daten von (Stobbe et al. 2015) und (Bieser et al. 2020)

Diese näherungsweise Abschätzung wurde wie folgt vorgenommen:

- Die THG-Emissionen aus der Nutzung wurden aus dem Strombedarf nach Stobbe et al. für die Jahre 2020 und 2025 mit einem Emissionsfaktor für den deutschen Strommix in Höhe von 0,468 kg CO_2e/kWh nach Icha 2020 berechnet.
- Für die Abschätzung der THG-Emissionen aus der Herstellung der Geräte und der digitalen Infrastruktur wurde bei den Endgeräten (die in den Haushalten auch Geräte der Unterhaltungselektronik mit einschließen) ein Anteil von 50 Prozent, bei Rechenzentren und

Telekommunikationsnetzen jeweils noch ein Anteil von 10 Prozent an den gesamten THG-Emissionen angesetzt, wobei analog zu (Bieser et al. 2020) zur Berechnung ein etwas höherer Emissionsfaktor für den weltweiten Strommix in Höhe von 0,475 kg CO_2e/kWh angesetzt wurde. Die Abschätzung berücksichtigt implizit die Nutzungsdauer der Endgeräte und der IKT-Infrastruktur, d.h. bei den auf ein Jahr bezogenen Emissionen ist der Herstellungsaufwand anteilig enthalten. Daneben beinhalten die abgeschätzten Emissionen aus der Herstellung sowohl die THG-Emissionen aus dem Energieaufwand bei der Herstellung selbst, aber auch die mit der vorgelagerten Ressourcengewinnung und Materialherstellung verbundenen THG-Emissionen.

Nach dieser Abschätzung belaufen sich die jährlichen THG-Emissionen in Deutschland durch die Digitalisierung auf rund 33,6 bzw. 33,0 Mio. Tonnen CO_2e in 2020 respektive 2025. Gemessen an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland in 2019 – also dem letzten Jahr vor der Corona-Pandemie - mit rund 805 Mio. Tonnen CO_2e entspricht dies einem Anteil von rund 4,1 Prozent. Vor dem Hintergrund der von Bieser et al. 2020 im globalen Maßstab als wahrscheinlich ermittelten Spannbreite von 1,8 bis 3,2 Prozent (siehe oben) ist die hier berechnete Abschätzung durchaus plausibel, da Deutschland als hoch entwickeltes Industrieland einen höheren Ausstattungsgrad an Endgeräten und digitaler Infrastruktur aufweist. Ein tendenziell höherer Wert als bei der von Bieser et al. vorgenommenen globalen Betrachtungsweise ergibt sich auch dadurch, dass die THG-Emissionen aus dem Herstellungsaufwand von IKT-Endgeräten und der IKT-Infrastruktur in großen Teilen außerhalb Deutschlands anfallen, wodurch bei einem Bezug der abgeschätzten gesamten direkten THG-Emissionen der Digitalisierung auf die gesamten Inlandsemissionen der Anteil höher ausfällt. Umgekehrt ist mit Blick auf die Interpretation der hier für Deutschland vorgenommenen Abschätzung wichtig, dass die zugrunde gelegten Basisdaten zum Strombedarf aus Abschnitt 4.2 auf Grund der dynamischen Entwicklung des IKT-Sektors inzwischen als überholt angesehen werden, d.h. die durchgeführte Abschätzung dürfte die tatsächlichen THG-Emissionen eher unter- als überbewerten. Eine genauere Berechnung der direkten THG-Emissionen der Digitalisierung für Deutschland ist auf der Basis verfügbarer Quellen im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

4.4 Berechnungen des individuellen digitalen CO_2-Fußabdrucks

Bei den in den Abschnitten 4.2 und 4.3 dargestellten Ergebnissen wurden in den zugrunde liegenden Literaturquellen jeweils durchschnittliche Daten zum Bestand und zur Nutzung von Geräten und Infrastruktur und dem damit verbundenen Strombedarf in den resultierenden THG-Emissionen abgeschätzt. Ein anderer Weg wird mit sogenannten CO_2-Rechnern begangen; bei diesen sind in der Regel keine Durchschnittsdaten, sondern individuelle Annahmen oder Angaben zum Bestand und den Nutzungsgewohnheiten Ausgangspunkt für die Berechnung der daraus resultierenden Umwelteffekte, einschließlich des dann individuellen CO_2-Fußabdrucks.

In einer 2020 im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) erstellten Studie wurde zur Berechnung des ökologischen Fußabdruckes durch die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen der Informationstechnik in Deutschland eine Vielzahl an Modellannahmen getroffen; die wichtigsten werden nachstehend zusammengefasst (Gröger 2020):

- Der Fußabdruck wird für eine einzelne Person bzw. einen Haushalt berechnet, der sich durch die jeweilige Geräteausstattung und Gerätenutzung auszeichnet. Zeitlicher Bezug ist ein Jahr. Die Einheit des ökologischen Fußabdruckes durch die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen der Informationstechnik ergibt sich damit zu Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Jahr (kg CO_2e/a).

- Der Untersuchungsrahmen umfasst die Herstellung der Produkte[20] und die Nutzungsphase; bei Dienstleistungen[21] werden die CO_2e-Emissionen berechnet, die bei der Bereitstellung der Dienstleistung anfallen.
- Die THG-Emissionen aus der Herstellung wurden im Rahmen der Studie aus bestehenden Ökobilanzen zusammengestellt. Dies hat zur Folge, dass die Daten möglicherweise inkonsistent und ungenau sind, da unterschiedliche Bewertungsmethoden, technische Standards, Materialdatenbanken, Herstellungsorte, Emissionsfaktoren usw. zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sind die herangezogenen Ökobilanzen nicht durchweg durch unabhängige Gutachter qualitätsgesichert. Die Treibhausgasemissionen zur Herstellung stellen daher nur eine Orientierung der Umweltauswirkungen dar.
- Transportemissionen zum Transport der Produkte zum Kunden werden berücksichtigt, sofern diese von den recherchierten Ökobilanzen mit ausgewiesen wurden.
- Die Emissionen zur Entsorgung der Produkte oder mögliche Treibhausgasgutschriften für recycelte Werkstoffe werden nicht berücksichtigt; sie spielen mit Blick auf die Klimarelevanz erfahrungsgemäß gegenüber der Herstellung und Nutzung eine untergeordnete Rolle.
- Da nicht für alle technischen Geräte Ökobilanzen, Angaben zur Erstnutzungsdauer und tägliche Nutzungszeiten verfügbar waren, wurden die jeweiligen Parameter auf Grundlage des Expertenwissens des Öko-Institutes hergeleitet und abgeschätzt („educated guess“).
- Der Herstellungsaufwand der Geräte wird auf ein Jahr bezogen, indem der gesamte Herstellungsaufwand durch die Anzahl an Jahren der Nutzungsdauer des ersten Besitzers („Lebensdauer Erstnutzung“) geteilt wird. Dies kann entweder die tatsächliche technische Lebensdauer sein, wenn das Gerät nach Erstnutzung entsorgt wird oder ein kürzerer Zeitraum, wenn das Gerät anschließend einer Zweitnutzung zugeführt wird (z.B. als Gebrauchtgerät). Definitionsgemäß haben Geräte in der Zweitnutzung daher keinen Herstellungsaufwand.
- Der Energieverbrauch der Geräte berechnet sich aus den jährlichen Nutzungsstunden und der elektrischen Leistungsaufnahme sowie ggf. zuzüglich der jährlichen Standby-Verluste.
- Zur Berechnung der mit dem Stromverbrauch zusammenhängenden CO_2e-Emissionen geht das Modell von einem einheitlichen Emissionsfaktor des deutschen Strommixes gemäß den Berechnungen des Umweltbundesamtes von 0,468 kg/kWh für das Jahr 2018 aus (Icha 2020).
- Als Formel beschrieben, stellt sich die Treibhausgasbilanz von Produkten wie folgt dar:

$$THG_{Produkt\ X} = \frac{THG_{Herstellung}}{Lebensdauer\ Erstnutzung} + Emissionsfaktor_{Strom} *$$

$$(Jährliche\ Nutzungsstunden * P_{Aktiv} + (8760\ h - Jährliche\ Nutzungsstunden)\ * P_{Standby})$$

- Die Treibhausgasemissionen der Dienstleistungen werden über einen Mengenfaktor aus der Anzahl oder Intensität der jährlich in Anspruch genommenen Dienstleistungen berechnet.

$$THG_{Dienstleistung\ Y} = Inanspruchnahme * THG_{pro\ Nutzungseinheit}$$

- Der ökologische Fußabdruck durch die Nutzung von Produkten und Dienstleistungen der Informationstechnik berechnet sich als Summe aller genutzten Produkte und Dienstleistungen.

[20] Konkret wurden Computer, Fernsehgeräte, Smartphones, Tablet-Computer, Spielkonsolen, Router, Sprachassistenten sowie Smart-Home- einschließlich Internet-of-Things-Equipment einbezogen.
[21] Berücksichtigt wurde die Internetnutzung (über kabelgebundene und mobile Netzwerke), Streamingdienste und Cloud-Storage.

Zur Berechnung des Fußabdrucks unterscheidet Gröger zwischen einer durchschnittlichen und einer intensiven Nutzung; die Unterschiede in Geräteausstattung und -nutzung sowie in der Inanspruchnahme digitaler Dienstleistungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 6: Eingangsdaten für durchschnittliche und intensive Nutzung digitaler Geräte und Dienstleistungen

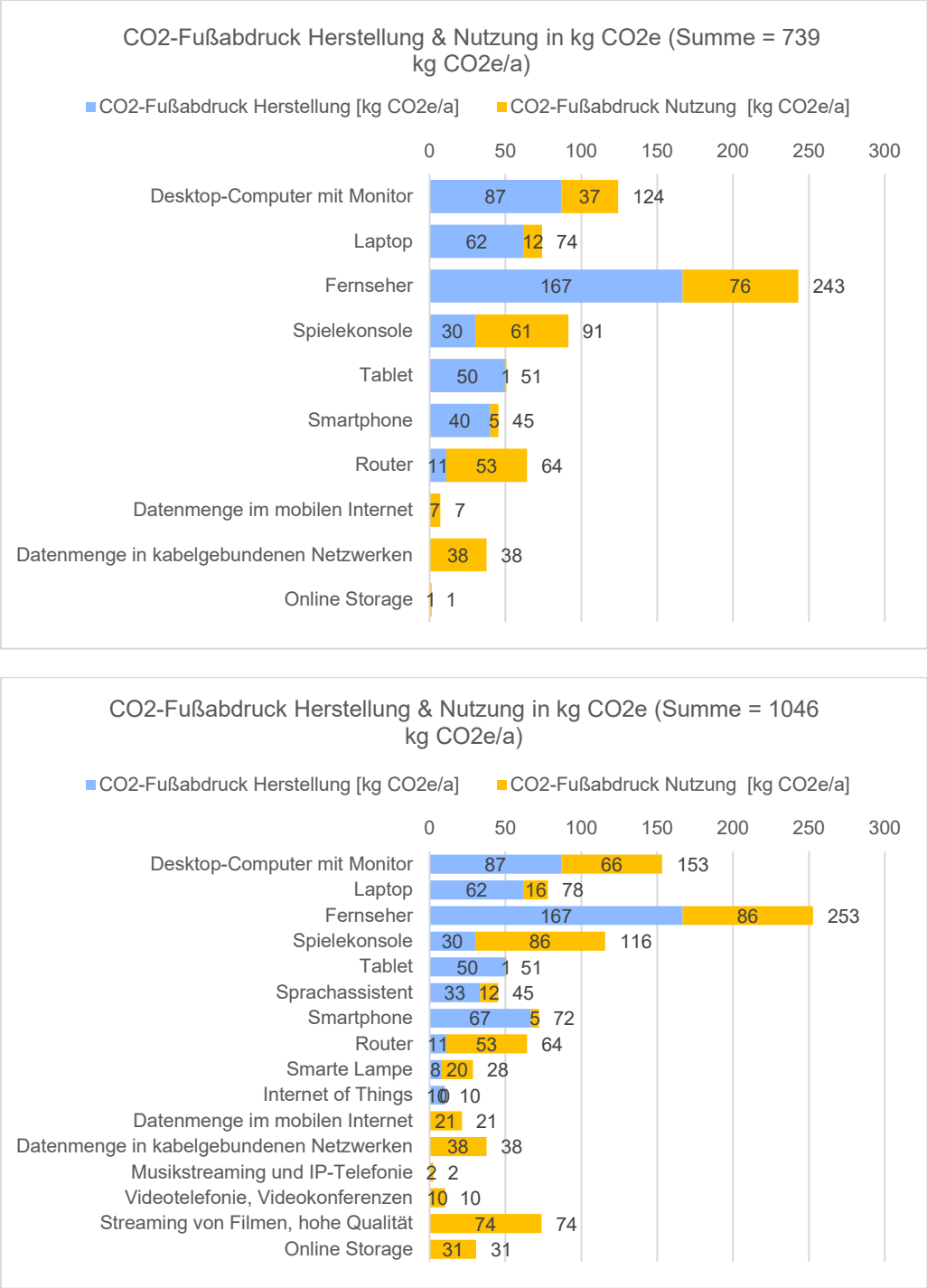
	Durchschnittliche Nutzung		Intensive Nutzung	
	Anzahl Geräte	Nutzungs-intensität / Annahmen	Anzahl Geräte	Nutzungs-intensität / Annahmen
IKT-Geräte				
Desktop-Computer mit Monitor	1	2 h/d	1	4 h/d
Laptop	1	2 h/d	1	4 h/d
Fernseher	1	4 h/d	1	4 h/d
Spielekonsole	1	0,5 h/d	1	2 h/d
Tablet	1	1 h/d	1	1 h/d
Sprachassistent	-	-	1	1 h/d
Smartphone	1	2,5 Jahre	1	1,5 Jahre
Router	1	24 h/d	1	24 h/d
Smarte Lampen	-	-	10	Standby-Verluste
IoT-Kleingeräte (z.B. Fitnesstracker)	-	-	5	nur Herst.-aufwand
IKT-Dienstleistungen				
Datenmenge im mobilen Internet	5 GB / Monat		15 GB / Monat	
Musikstreaming	-		2 h/d	
Videokonferenzen	-		2 h/d	
HD-Videostreaming	-		4 h/d	
Online Storage	10 GB genutzte Speicherkapazität		250 GB genutzte Speicherkapazität	

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Gröger 2020)

Die Ergebnisse des CO_2-Fußabdrucks für beide angenommenen Nutzungsszenarien sind in der nachstehenden Abbildung zusammengefasst. Im Ergebnis führt die angenommene durchschnittliche Nutzung zu einem Footprint von rund 740 Kilogramm CO_2e pro Jahr, bei intensiver Nutzung steigt dieser Wert auf rund 1.050 Kilogramm CO_2e pro Jahr an. Setzt man diese Ergebnisse in Bezug auf die jährlichen Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland von rund 11 Tonnen CO_2e, ergeben sich

Anteile zwischen 6,7 und 9,5 Prozent. Mit Blick auf ambitionierte Klimaschutzanstrengungen sind diese Anteile besonders problematisch, da diese im Gegensatz zu anderen Anteilen am CO_2-Fußabdruck wie beispielsweise Wohnen nach den bisherigen Prognosen bestenfalls stagnieren, bedingt durch eine zunehmende Ausstattung an IKT-Geräten und intensiverer Nutzung eher aber noch ansteigen.

Abbildung 4: Digitaler CO_2-Fußabdruck bei angenommener durchschnittlicher (oben) und intensiver (unten) Nutzung in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage von (Gröger 2020)

Für beide Szenarien zeigt sich, dass der Herstellungsaufwand der IKT-Geräte keineswegs vernachlässigt werden kann, er beträgt bei durchschnittlicher Ausstattung 447 Kilogramm, beim intensiven Nutzungsszenario 525 Kilogramm CO_2e pro Jahr. In beiden Szenarien stammen die größten Beiträge für die gesamten Treibhausgasemissionen aus Herstellung und Nutzung von Fernsehgeräten, Computern (Desktop und Laptop) und den Spielkonsolen. Obwohl die Spielekonsole nur 0,5 oder 2 Stunden am Tag genutzt wird, ist sie mit 91 bis 116 Kilogramm Treibhausgasemissionen für einen vergleichsweise hohen Anteil an den Gesamtemissionen verantwortlich. Im intensiven Nutzungsszenario führen die im Haushalt installierten Geräte allein durch ihren Stromverbrauch zu Treibhausgasemissionen in Höhe von 346 Kilogramm pro Jahr. Darüber hinaus zeigt sich an der intensiven Nutzung der Digitaltechnik die zusätzlichen Treibhausgasemissionen, die durch die Internetnutzung stattfinden. Mobiles Internet, Musikstreaming, Videotelefonie, Videostreaming und Online-Storage führen zusammen zu CO_2e-Emissionen von rund 140 Kilogramm pro Jahr. Der größte Posten davon ist mit 74 kg das Streamen von Filmen in HD-Qualität.

4.5 Einflussfaktoren und Trends von Energieverbrauch

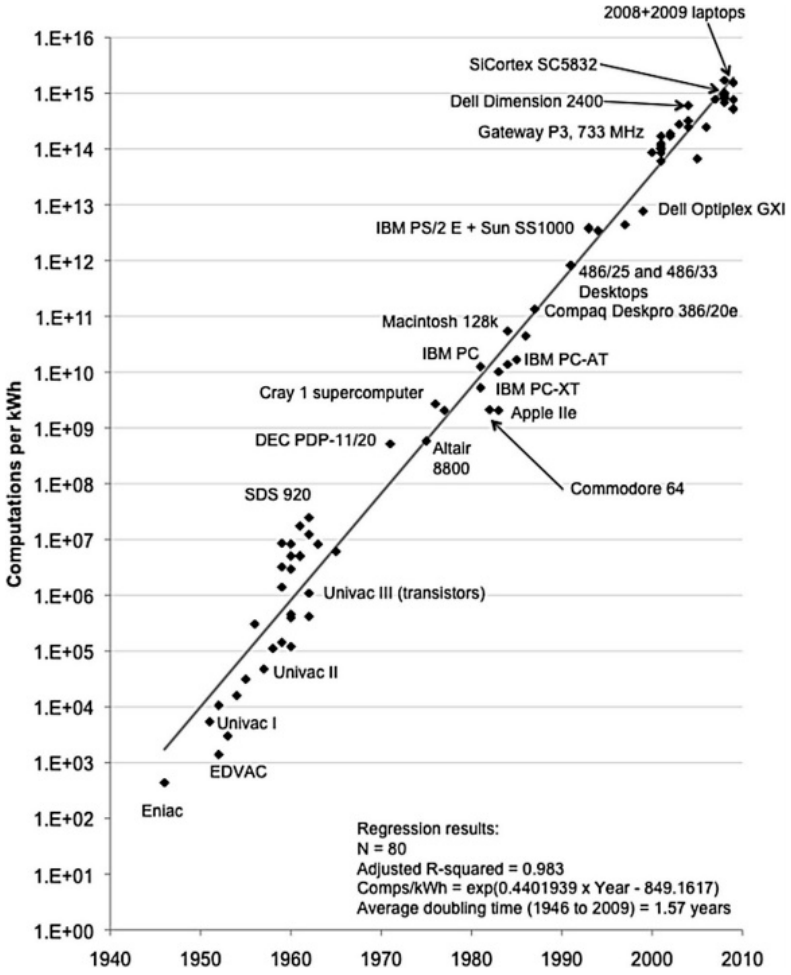
Neben den dargestellten quantitativen Abschätzungen werden in den folgenden Abschnitten exemplarisch Einflussfaktoren und Treiber beschrieben, die für den Status Quo und Trends des Energie- und Ressourcenverbrauchs der Digitalisierung relevant sind.

4.5.1 Entwicklung der Prozessorrechenleistung

Eine der mit entscheidenden Größen für die Erhöhung der Energieeffizienz der IKT-Technik liegt in der kontinuierlichen Miniaturisierung und Weiterentwicklung elektronischer Komponenten. Zur Beschreibung der Entwicklung der Energieeffizienz von Computern wird häufig das sogenannte Koomeysche Gesetz herangezogen (Koomey et al. 2011). Es beschreibt einen näherungsweisen exponentiellen Zusammenhang ähnlich wie das bekanntere Mooresche Gesetz. Nach Moore verdoppele sich die Integrationsdichte der Transistoren und damit die Rechenleistung auf einem Computerchip bis vor kurzem alle 18 Monate (in einer Variante auch alle 24 Monate).

Jonathan Koomey hat diese Wechselwirkung über einen Zeitraum von etwa 50 Jahren analysiert und die Ergebnisse dieser Untersuchung im Jahr 2011 publiziert, vgl. Abbildung 5. Darin wird aufgezeigt, dass sich die Prozessorrechenleistung pro Joule benötigter Energie bis zum Jahr 2000 etwa alle 1,6 Jahre verdoppelt hat; im Zeitraum 2000 bis 2010 verlangsamte sich dieser Trend insofern, dass die Verdoppelung der Rechenleistung pro Joule etwa 2,6 Jahre erfordert. Es deutet sich somit an, dass bei bestehenden Technologien in der Halbleiterindustrie eine Annäherung an naturgesetzliche Grenzen erfolgt. Allerdings liegen keine Studien vor, in denen der weitere Trendverlauf ab dem Jahr 2010 beschrieben wird. Ob und wann die in der Grundlagenforschung vorgeschlagenen Lösungsansätze zur Ablösung der klassischen Halbleitertechnik (vgl. Abschnitt 5) in Kapitel 2.2) in die kommerzielle Anwendung kommen und was dies für die Energieeffizienz der IKT-Technik bedeutet, kann derzeit nicht belastbar bewertet und quantifiziert werden.

Abbildung 5: Energieverbrauch pro Rechenoperation seit ENIAC Computer (Koomeysches Gesetz)

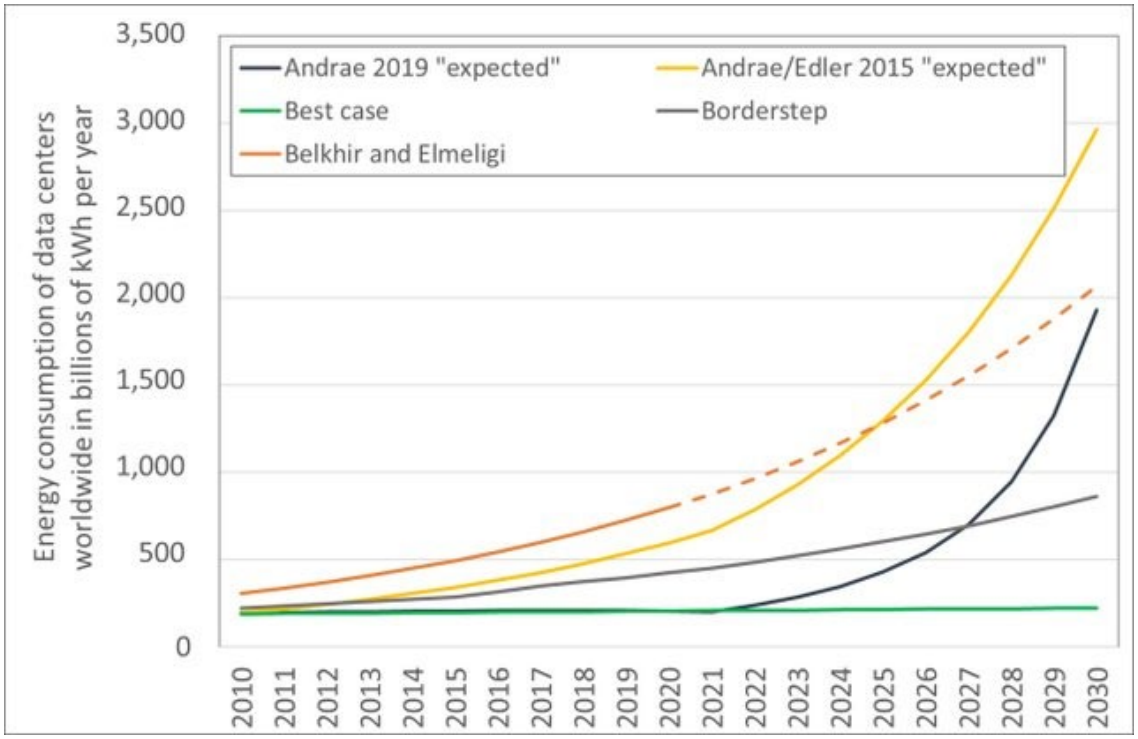


Quelle: Jonathan Koomey ; Stephen Berard ; Marla Sanchez ; Henry Wong, Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing, IEEE Annals of the History of Computing, Volume 33, Number 3, July-September 2011, pp. 46-54 (Article), DOI: 10.1353/ahc.2011.0028.

4.5.2 Trends im Bereich Rechenzentren

Ähnlich wie bei der Einschätzung der Entwicklung des globalen IKT-Energieverbrauchs und der THG-Emissionen (vgl. Abschnitt 4.3) werden für die spezifischere Frage nach den Rechenzentren sehr unterschiedliche Prognosen und Entwicklungsszenarien gegeben wie Abbildung 6 verdeutlicht. Für den weltweiten Energieverbrauch von Rechenzentren beispielsweise variiert die Bandbreite der Prognosen für 2030 um einen Faktor von zehn – von 300 bis 3.000 TWh jährlich (Hintemann und Hinterholzer) Aus diesem Grund wurde an prominenter Stelle in der Wissenschaftszeitschrift Science gefordert, mehr RZ-Daten öffentlich zu machen. Dadurch sollen bessere Modellierungen des Energieverbrauches von Rechenzentren ermöglicht werden (Masanet et al. 2020).

Abbildung 6: Globaler Energieverbrauch durch Rechenzentren



Quelle: R.Hintemann/S.Hinterholzer: Energy consumption of data centers worldwide; How will the Internet become green? Conference Paper, May 2020

Nach Ansicht der Internationalen Energieagentur (IEA) nehmen derzeit in einem Konzentrationsprozess sehr großen Rechenzentren zu (IAE 2020). Diese sogenannten „Hyperscale"-Datenzentren, wie sie beispielsweise von den Tech-Giganten Alibaba, Amazon und Google betrieben werden, sind dabei von der Server-Infrastruktur her durch Tausende weitgehend identische Rechner auf höchste Skalierbarkeit ausgelegt. So kann dynamisch und automatisiert die ständig schwankende Nachfrage der Kunden nach IT-Leistung erfüllt werden. Hyperscale-Rechenzentren können sehr energieeffizient betrieben werden. So erreichen die effizientesten Hyperscale-Rechenzentren eine Power usage effectiveness (PUE)[22] von 1,1 und sind damit bezogen auf die Energieaufnahme der Infrastruktur dieser Rechenzentren (gemeint sind damit Klimatisierung und unterbrechungsfreie Stromversorgung) schon nahe an einem praktisch erreichbaren Minimum. Ein diesem Konzentrationsprozess zwar diametral entgegenstehender, aber sich nicht ausschließender Trend ist das im Kapitel 2.2 beschriebene Edge Computing.

Für den spezifisch deutschen Kontext liegt aktuell nur eine große Untersuchung vor. Die Studie des Berliner Borderstep Instituts im Auftrag des Netzwerks energieeffiziente Rechenzentren (NeRZ) von Mitte 2017 prognostiziert die Entwicklung des Markts an Rechenzentren in Deutschland bis 2025 (Hintemann 2018). Die Studie basierte auf einem Strukturmodell der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland. Es wurden zudem eine Online-Befragung von Betreibern (die ca. ein Viertel der flächenmäßigen Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland repräsentierten) und Experten-Interviews geführt. Allerdings ist das Modell auf Grund der gemachten Annahmen umstritten.

[22] Power Usage Effectiveness (PUE) ist eine technische Kennzahl, mit der sich die Energieeffizienz eines Rechenzentrums darstellen lässt. Der PUE-Wert setzt die insgesamt in einem Rechenzentrum verbrauchte Energie ins Verhältnis mit der Energieaufnahme der IT-Infrastruktur. In der Praxis werden Werte bis 1,2 als sehr effizient beurteilt. Konventionelle Rechenzentren weisen in der Regel einen PUE-Wert von 1,9 auf.

Nach der Studie treiben Cloud-Rechenzentren das Wachstum in Deutschland. Bei 40 Prozent der befragten RZ stieg danach die IT-Fläche um mehr als 20 Prozent in fünf Jahren. Während die Mehrheit davon ausging, dass es bis 2025 keine weitere Wachstumstendenz bei der Fläche der Rechenzentren gibt, wird sowohl eine Zunahme der Server (knapp 30 Prozent erwarten sogar eine Zunahme von mehr als 25 Prozent) und auch des Energiebedarfes angenommen. Fast 40 Prozent der Hochschul- und Forschungs-RZ gingen dagegen bis 2025 von geringeren IT-Flächen aus. Dagegen wurden auch hier steigende Serverzahlen erwartet, allerdings bei insgesamt gleichbleibendem Stromverbrauch.

Die drei am häufigsten geplanten Energie- und CO_2-Einsparungsmaßnahmen sind die Beschaffung energieeffizienter Hardware, die Einrichtung eines Energiemanagementsystems, sowie Kalt- oder Warmgang-Einhausung. 45 Prozent der Befragten sehen auch künftig noch hohe bis sehr hohe Einsparpotenziale bei der Kühlung, Klimatisierung und Lüftung. 50 Prozent der RZ sehen mittlere bis sehr hohe Einsparungen durch Abwärmenutzung.

Betriebsdaten zeigen, dass RZ in der Praxis nur wenig ausgelastet sind. Beispielsweise liegt die CPU-Auslastung von Servern in der Regel unterhalb von 20 Prozent und selten höher als 30 Prozent. Das bedeutet, dass 70 bis 80 Prozent der IT-Ressourcen ungenutzt sind und Energie im Leerlauf verbrauchen, ohne dass sie Rechenleistung erbringen. Die Effizienz von Rechenzentren hängt aber entscheidend von der Auslastung ab. Durch Virtualisierung von Diensten, aber auch durch den Einsatz von modular zuschaltbaren oder erweiterbaren Komponenten wäre nach neuesten Erkenntnissen eine Steigerung der Auslastung auf mehr als 50 Prozent möglich. Beim Treibhausgaspotenzial (GWP) und Primärenergiebedarf (KEA) ist die Nutzungsphase der RZ für 87 (Gröger et al. 2020) bis 98 Prozent (Arndt et al. 2017) der Umweltwirkungen verantwortlich.

4.5.3 Trends im Bereich Telekommunikationsnetze

Laut der letzten IEA-Berechnung verbrauchten Telekommunikationsnetze im Jahr 2015 weltweit 185 TWh an Strom, wovon 2/3 auf die Mobilfunknetze entfielen (IEA, International Energy Agency 2017). Die Prognosen zur künftigen Entwicklung hängen stark von der weiteren Entwicklung der Energieeffizienz ab, wobei es hier unterschiedliche Einschätzungen gibt. In der Studie der Internationalen Energieagentur schwankte die Fünf-Jahresprognose für 2021 je nach Szenario zwischen einem um 70 Prozent erhöhter Stromverbrauch und eine Verringerung um 15 Prozent.

Moderne 5G-Mobilfunknetze sind um einen Faktor von 20 effizienter bei der Datenübertragung als alte Mobilfunknetze (3G). 5G ist auch dreifach effizienter als das 4G-Netz. Für den Anwendungsfall Videostreaming bedeutet dies, dass bei einer einstündigen Übertragung über das 5G-Netz rund 5 Gramm CO_2 anfallen, beim derzeit gängigen 4G-Mobilfunknetz (LTE) sind es rund 13 Gramm und das alte 3G-Netz (UMTS) erfordert 90 Gramm an THG (Gröger et al. 2020).

4.5.4 Trends im Bereich Endgeräte

Der Entwicklungstrend beim IKT-Gesamtenergieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland ist nach Angaben des Umweltbundesamts rückläufig. So sank im Zeitraum zwischen 2008 und 2018 der Netto-Gesamtstromverbrauch aller privaten Haushalte von 140 TWh auf 127 TWh.[23] Darüber hinaus sank der relative Anteil des Stromverbrauchs von Informations- und Kommunikationstechnik am Netto-Gesamtstromverbrauch aller privaten Haushalte von 17,6 Prozent auf 16,9 Prozent. Damit fiel der private IKT-Energieverbrauchs in der letzten Dekade in absoluten Werten noch etwas stärker

[23] Im Zeitraum 2008 bis 2018 erhöhte sich dabei die Bevölkerungszahl in Deutschland von 82 Millionen auf 83 Millionen Statista 2020b.

als der Nettostromverbrauch der privaten Haushalte. Dabei muss beachtet werden, dass sich diese Angaben auf die Haushalte mit der dort vorhandenen Geräteinfrastruktur beziehen. Allerdings sind darin die bei der Internetnutzung erforderlichen Stromverbräuche in der Übertragungsinfrastruktur und in Rechenzentren nicht berücksichtigt; wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, ist in diesen Teilbereichen mit steigendem Energieverbrauch zu rechnen.

4.6 THG-Minderungspotenziale bei Endgeräten und in der IKT-Infrastruktur

Für die Bewertung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen der Digitalisierung ist es neben einer Berücksichtigung der Trends auch relevant, welche Minderungspotenziale im Energieverbrauch und bei den THG-Emissionen bestehen. In den nachfolgenden Abschnitten wird dazu ein zusammenfassender Überblick zu den wichtigsten Aspekten gegeben.

4.6.1 Effiziente Endgeräte

Bei der Darstellung und Diskussion des Strombedarfs der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland (vgl. Abschnitt 4.2) wurde bereits dargestellt, dass die von (Stobbe et al. 2015) prognostizierte Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs maßgeblich auf einer technischen Optimierung von IKT-Endgeräten beruht und insbesondere auf die deutliche Reduktion der Leistungsaufnahme bei Fernsehern, Monitoren und Computern zurückgeführt wird. Ein weiterer Beitrag zur Einsparung des Strombedarfs wird auf die intensivere Nutzung energiesparenderer, konvergenter und mobiler Produkte wie Notebooks, Tablets und insbesondere Smartphones anstelle von Desktop PCs und anderen Geräten zurückgeführt.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt ein Vorhaben, in dem für das Land Baden-Württemberg eine Bewertung der in der Landesstrategie Green IT 2020 dargestellten Maßnahmen auf ihr Potenzial zur Energie- und Ressourceneinsparung vorgenommen wurde. Große Einsparpotenziale konnten hier im Bereich von Endgeräten durch den Ersatz von (alten) PC-Geräten durch Laptops, Mini-PC oder Thin-Clients, aber beispielsweise auch durch die Nutzung von Mehrpersonendruckern anstelle von individuell genutzten Tischdruckern erreicht werden (Köhler 2017). Eine Auswahl besonders relevanter Maßnahmen ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 7: Potenziell mögliche Energieeinsparungen durch ausgewählte GreenIT-Maßnahmen im Bereich von Endgeräten in einer Landesverwaltung

Maßnahme	Einsparung		
	pro Gerät	je Maßnahme [MWh/a]	bezogen auf Baseline
50% aller PCs mit Laptop Modell ersetzen	87%	8.683	20%
Alle PCs durch Mini PCs ersetzen	91%	18.106	42%
Alle PCs durch Thin Client ersetzen (plus Serverleistung)	77%	15.315	35%
Alle Tischdrucker durch Mehrpersonendrucker ersetzen	87%	4.080	9%
Baseline	43.426		

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Köhler 2017)

4.6.2 Verlängerung der Nutzungsdauer von IKT-Geräten

Unter der Zielsetzung einer Verringerung von THG-Emissionen würde ein ausschließlicher Fokus auf die Energieeffizienz von Geräten in der Nutzungsphase fehlleiten. So haben bereits 2011 Prakash et al. gezeigt, dass es ökologisch nicht sinnvoll ist, Entscheidungen zum vorzeitigen Ersatz der IKT-Geräte unter der Zielsetzung der Stromeinsparung bei der Gerätenutzung ohne Berücksichtigung des Herstellungs-, Distributions- und Entsorgungsaufwands zu treffen. Die Herstellung von IKT-Geräten – wie Notebooks – ist sehr energieintensiv und belastend für die Umwelt. So kann die Herstellungsphase, je nach getroffenen Annahmen, zwischen 56 und 75 Prozent der Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks ausmachen (Prakash et al. 2011). In einem vom Umweltbundesamt beauftragten Vorhaben wurden u.a. ökologische und ökonomische Vergleichsrechnungen zwischen unterschiedlichen Varianten von Arbeitsplatzcomputern vorgenommen (Desktop-PC, Mini-PC, Notebook, jeweils mit Peripherie, siehe (Prakash et al. 2016a)). Die Ergebnisse der Ökobilanz verdeutlichen, dass der größte Anteil der gesamten Treibhausgasemissionen auf die Hardwareherstellung zurückzuführen ist. Ferner konnte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, Notebooks so lange wie möglich zu nutzen und gegebenenfalls aufzurüsten oder zu reparieren, als in kurzen Intervallen neue Notebooks zu beschaffen. Neue, womöglich energieeffizientere Computergenerationen werden dadurch erst später in Betrieb genommen. Dadurch wird zwar in der Nutzung geringfügig mehr Strom verbraucht – über zehn Jahre macht das ca. 5 kg CO_2e pro Gerät aus. Dieser Mehraufwand an Treibhausgasemissionen wird allerdings durch die Nutzungsdauerverlängerung der Hardware überkompensiert, wie die Berechnungen bestätigen.

Gegen eine Verlängerung der Nutzungsdauer wirkt die Obsoleszenz. Prakash et al. haben in einer weiteren Studie dieses Phänomen für verschiedene Elektro- und Elektronikgeräte, darunter auch TV-Geräte, Notebooks und Smartphones, grundlegend untersucht (Prakash et al. 2016b), um handlungssichere Strategien gegen Obsoleszenz zu entwickeln. Die Ergebnisse zeigen, dass digitale Endgeräte aus vielfältigen Gründen ersetzt werden. Dabei wirken werkstoffliche, funktionale, psychologische und ökonomische Obsoleszenz-Formen zusammen und erzeugen ein hochkomplexes Muster. Dementsprechend sind die identifizierten Strategien, um Obsoleszenz entgegen zu wirken, vielschichtig angelegt und adressieren die Themencluster mangelnde mechanische und elektronische Robustheit, softwarebedingte Gründe, Reparaturkosten im Kontext der Preise für Neuprodukte sowie Aspekte der psychologischen Obsoleszenz. In Tabelle 8 wird ein Überblick zu den empfohlenen Strategien gegeben (Prakash et al. 2016b):

Tabelle 8: Strategien gegen Obsoleszenz

Themencluster Obsoleszenz-ursachen		Strategien gegen Obsoleszenz	
1	Mangelnde mechanische und elektronische Robustheit	Strategie 1: Lebensdaueranforderungen, Standardisierung, Normung	
		S 1.1	Unterstützung von freiwilligen Lebensdauertests durch entsprechende Prüfnormen und unter kritischen Prüfbedingungen
		S 1.2	Verpflichtende Lebensdauertests unter kritischen Prüfbedingungen und Angabe Lebensdauer in den technischen Unterlagen und/oder als Teil der Verbraucherinformation
		S 1.3	Erarbeitung von Prüfmethoden und -normen zur Überprüfung der Lebensdauerprüfung für Bauteile und Geräte
		S 1.4	Untersuchung des Einflusses der realen Nutzungsbedingungen auf die Lebensdauer und Etablierung einer Norm mit kritischen Prüfbedingungen
		S 1.5	Design für Langlebigkeit
		S 1.6	Vermehrte Tests der Lebensdauer durch unabhängige Testinstitute, wie die Stiftung Warentest
2	Softwarebedingte Gründe	Strategie 2: Mindestanforderungen an die Software	
		S 2.1	Entwicklung von innovativen und modularen Software-Lösungen
		S 2.2	Grundlegende Software-Treiber müssen eine ausreichend lange Zeit vorgehalten bzw. aktualisiert werden
		S 2.3	Förderung von freien Soft- und Hardware-Initiativen sowie Schaffung von Rechtssicherheit zu deren Verwendung und Vermarktung
		S 2.4	Verpflichtende Hardware und Software Updates sowie volle Funktionstests
		S 2.5	Standardisierung, Fehlerdiagnosefunktion und neue Softwarelösungen
3	Hohe Kosten der Reparatur im Kontext der Preise für Neuprodukte	Strategie 3: Reparaturfähigkeit	
		S 3.1	Verbesserte Rahmenbedingungen für unabhängige und freie Reparaturbetriebe, einschließlich transparente Reparaturinformationen
		S 3.2	Pflichtvorgaben zur Vorhaltung von Ersatzteilen, einschließlich transparente Informationen bezüglich der zu erwartenden Kosten für Ersatzteile
		S 3.3	Akkus und sonstige Verschleißteile müssen leicht auswechselbar oder reparierbar sein
		S 3.4	Veränderung der Kostenkalkulation für Reparaturen
		Strategie 4: Servicemodelle der Hersteller für eine Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung	
		S 4.1	Leasing-Modelle (als eigentumsersetzende Nutzungsstrategie)
		S 4.2	Rückkaufvereinbarung
		S 4.3	Nachsorgebehandlung als Dienstleistung
4	Übergreifend: kürzere Nutzungsdauer durch Verbraucherinnen und Verbraucher	Strategie 5: Informationspflichten, Verbraucherinformation	
		S 5.1	Eindeutige Deklaration von Sollbruchstellen (im Sinne Sicherheitsfunktion), Verschleißteilen und Wartungsintervallen
		S 5.2	Verbraucherinformation zur Verlängerung der Nutzungsdauer

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Prakash et al. 2016b)

Auch die Digitalagenda des BMU greift den Aspekt der Nutzungsdauerverlängerung im Zusammenhang mit digitalen Endprodukten auf. So beinhalten die vorgeschlagenen Maßnahmen auch eine erweiterte europäische Herstellerpflicht zu Aussagen über die garantierte Lebensdauer von digitalen elektronischen Produkten, die Schaffung verbindlicher Regelungen zur Bereitstellung von Updates, Reparaturanleitungen, Ersatzteilen und Werkzeugen sowie herstellerübergreifenden Lösungen zum Austausch von Akkus, Displays und weiteren kurzlebigen Hardwarekomponenten als

Grundlage eines europäischen Rechts auf Reparatur. Umgesetzt könnte dies im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie oder einer Reparaturrichtlinie für Elektro- und Elektronikgeräte (BMU 2020).

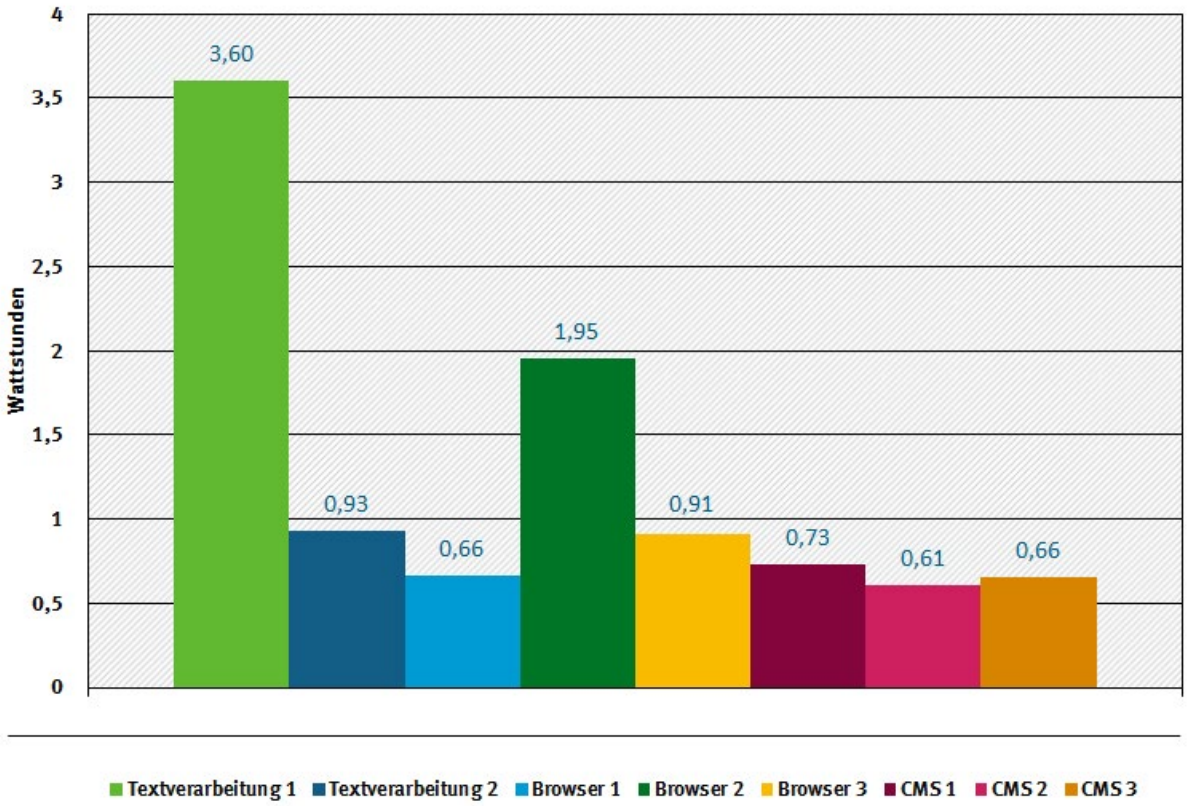
4.6.3 Effiziente Software

Software-Produkte sind zwar immaterielle Güter, die Nutzung von Software kann aber erhebliche Stoff- und Energieströme auslösen. Erst seit wenigen Jahren wird zunehmend erkannt, dass Eigenschaften der Software entscheiden, welche Hardwarekapazitäten vorgehalten werden und wieviel elektrische Energie in Endgeräten, Netzwerken und Rechenzentren verbraucht wird. Hilty et al. haben in einer 2015 veröffentlichten Studie explorativ den Einfluss von Software auf die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen durch IKT-Systeme untersucht. In der Nutzungsphase werden vier Wirkungsmechanismen unterschieden, durch die ein Softwareprodukt natürliche Ressourcen beanspruchen kann (Hilty et al. 2015):

- **Stromverbrauch:** Software verursacht während ihrer Ausführung Stromverbrauch durch die Hardware; dies gilt nicht nur für das lokale Endgerät, sondern auch für Netzwerkkomponenten, Server und weitere Geräte, die am Prozess mitwirken.
- **Hardware-Auslastung:** Software belegt während ihrer Ausführung Hardwarekapazitäten, die während dieser Zeit nicht anderweitig genutzt werden können. Deshalb ist ein entsprechender Anteil am gesamten Lebenszyklus der Hardware (und mit der Herstellung der Hardware verbundene THG-Emissionen) der Software zuzurechnen.
- **Hardware-Management:** Software kann Betriebszustände der Hardware beeinflussen, insbesondere Energiesparmodi nutzen oder verhindern und die Rechen- oder Speicherlast in Netzwerken verteilen. Dies beeinflusst das Ausmaß und den Zeitpunkt des Stromverbrauchs durch die Hardware und auch die Effizienz der Hardware-Nutzung.
- **Hardware-Nutzungsdauer:** Softwareprodukte können den Zeitpunkt der Außerbetriebnahme (Obsoleszenz) von Hardwareprodukten beeinflussen, indem z. B. neue Versionen eines Softwareprodukts den Ersatz funktionierender Hardware durch leistungsfähigere Hardware nahelegen oder indem schlankere Installationen oder effizientere Versionen eines Softwarepakets die Weiternutzung älterer Hardware ermöglichen.

In einer neueren Studie konnte nachgewiesen werden, dass diese grundsätzlichen Wirkungsmechanismen unter Praxisbedingungen durchaus relevant sind. Für einen Praxistext wurden elf verschiedene Softwareprodukte aus vier verschiedenen Software-Produktgruppen ausgewählt: zwei Textverarbeitungsprogramme, drei Internetbrowser, drei Content Management Systeme (CMS) und drei Datenbanksysteme (Gröger et al. 2018). Für den Vergleich wurden jeweils Standardnutzungsszenarien festgelegt, die eine möglichst repräsentative Nutzung des jeweiligen Softwareprodukts über einen festgelegten Zeitraum beschreiben. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass es deutliche Unterschiede beim Energieverbrauch zwischen Softwareprodukten mit gleicher Funktionalität gibt, vgl. Abbildung 7. So unterscheiden sich insbesondere die Textverarbeitungsprogramme deutlich: Während die Ausführung des Standardnutzungsszenarios mit dem Textverarbeitungsprogramm 1 einen Energieverbrauch von 3,6 Wattstunden auf dem lokalen Computer verursacht, sind es beim Textverarbeitungsprogramm 2 nur 0,93 Wattstunden. Obwohl beide Programme die gleichen Aufgaben erfüllen, benötigt Programm 2 nur rund ein Viertel an elektrischer Energie und ist damit deutlich energieeffizienter.

Abbildung 7: Vergleich des Energieverbrauchs eines lokalen Geräts bei der Ausführung verschiedener Software-Produkte unter definierten Standardnutzungsszenarien



Quelle: Messungen Hochschule Trier in (Gröger et al. 2018)

Ausgehend von dem im oben genannten Forschungsprojekt entwickelten Kriterienkatalog mit insgesamt 25 Kriterien und 76 Indikatoren zur Überprüfung der Umweltauswirkung von Softwareprodukten, wurde ein Beschaffungsleitfaden entwickelt (Gröger 2018 - Korrekturversion 2020). Dieser Leitfaden basiert auf einem vereinfachten und reduzierten Kriterienkatalog mit 13 Kriterien und 32 Unterkriterien, der sich für die Beschaffung von Software eignet. Die Kriterien dienen dazu, nachhaltige Software zu erkennen und zu entwickeln. Der Kriterienkatalog kann sowohl bei der Beschaffung fertiger Standardsoftware als auch bei der Beauftragung einer Software-Entwicklung eingesetzt werden (ebd.).

4.6.4 Effiziente Rechenzentren

In Abschnitt 4.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass Rechenzentren und Telekommunikationsnetze im Jahr 2025 mit zusammen 25 TWh gut die Hälfte des gesamten IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland ausmachen; Treiber dieser Entwicklung ist primär eine intensivere Internetnutzung, zum Beispiel durch das Streaming von hochauflösenden Videos. Bei dieser Prognose wird angenommen, dass der technische Fortschritt auch weiterhin in regelmäßigen Abständen eine Leistungsverbesserung auf Komponentenebene generiert, schrittweise das Power Management weiterentwickelt und damit auch softwareseitig die Energieeffizienz der IKT-Infrastruktur verbessert wird. Zudem wird auch unterstellt, dass Energiewandlungsverluste minimiert

werden können, wodurch sich der Energiebedarf zur Klimatisierung in Rechenzentren ebenfalls reduziert (Stobbe et al. 2015).

Der Energiebedarf von Rechenzentren und mögliche Minderungspotenziale sind von sehr vielen Einzelfaktoren abhängig. Beim Code of Conduct der EU zur Energieeffizienz von Rechenzentren werden allein acht Verantwortungsbereiche unterschieden: Gebäude, elektrische und mechanische Anlagen, die Datenetagen und Datenschränke, die IT-Ausrüstung, das Betriebssystem und die Virtualisierungssoftware, Anwendungssoftware sowie die Betriebspraxis (Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J. 2021). Bei den einzelnen Bereichen und einzelnen Maßnahmen wird ferner danach differenziert, ob es sich um bestehende oder neue Rechenzentren handelt. Im Falle von Bestandsrechenzentren werden weniger eingreifende Praktiken gefordert. In der nachstehenden Tabelle 9 werden die Maßnahmenbereiche und die wichtigsten Maßnahmen sowie einzelne Beispiele von Praktiken aufgeführt, die auf die Erhöhung der Energieeffizienz abzielen.

Eine der wichtigsten Ursachen für ineffizient betriebene Rechenzentren ist die Überbelegung von Platz, Strom oder Kühlung und der Betrieb der Anlagen bei Teilauslastung. Der monolithische im Gegensatz zum modularen Aufbau von Anlagen stellt ebenfalls einen erheblichen und häufig unnötigen Kapitalaufwand dar. Darüber hinaus steigen mit zunehmender Ausfallsicherheit des Rechenzentrums die Ineffizienzen durch fixe Gemeinkosten, was durch eine schlechte Auslastung noch verstärkt wird (Acton et al. 2020).

Da sich einzelne Rechenzentren stark unterscheiden, ist eine allgemeine Quantifizierung der möglichen Minderungspotenziale nicht möglich. Im Rahmen der Bewertung der in der Landesstrategie Green IT 2020 des Landes Baden-Württemberg dargestellten Maßnahmen konnten im Bereich Rechenzentren die folgenden fünf Maßnahmen mit den höchsten prozentualen Energieeinsparpotenzialen ermittelt werden (Köhler 2017):

- Einsatz energieeffizienter Kälteanlagen (28 % Einsparung)
- Verminderung der Distanz zwischen Kühlsystem und Servern (33 % Einsparung)
- Prüfung und Bewertung verschiedener Kühlverfahren (z B. freier Kühlung) bei Neu- oder Umbau (31 % Einsparung)
- Bedarfsgerechte Wahl umweltverträglicher Kühlmedien (gasförmig, flüssig) und Kältemittel (22 % Einsparung)
- Entwicklung u. Umsetzung eines Kühl-/Abwärmekonzepts bei Neubau eines Rechenzentrums (28 %)

Tabelle 9: Maßnahmenbereiche, Maßnahmen und beispielhafte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren

Bereiche	Maßnahmen und Beispiele
Nutzung, Management und Planung von Rechenzentren	Einbindung aller Organisationseinheiten
	Allgemeine Richtlinien (Beispiele: Modelle der Leistungsverrechnung, Energie- und Umweltmanagement)
	Ausfallsicherheit und Auslegung
IT-Ausrüstung und Dienstleistungen	Auswahl und Einsatz von neuer IT-Technik (zum Beispiel Energieeffizienz, Klimaklasse, Kompatibilität zu Kühlsystemen, Effizienz von Spannungswandlern)
	Bereitstellung neuer IT-Dienstleistungen (Virtualisierungstechnologien, Auswahl oder Entwicklung effizienter Software)
	Verwaltung vorhandener IT-Technik und Dienstleistungen (zum Beispiel Außerbetriebnahme und Entfernung nicht genutzter Technik)
	Daten-Management (Beispiel: Löschung unnötiger Daten)
Kühlung	Design und Management des Luftstroms (Beispielsweise Anordnung Warm.- und Kaltgang)
	Management (zum Beispiel Anpassung an Änderungen in der IT-Technik)
	Vorgaben für Temperatur und Luftfeuchtigkeit
	Kälteanlagen (zum Beispiel freie Kühlung)
	Raumklimageräte
	Direkte Flüssigkeitskühlung
	Verwendung von Abwärme (zum Beispiel unter Nutzung von Wärmepumpen)
Stromversorgung und-verteilung	Auswahl und Einsatz neuer Technik (zum Beispiel modulare und skalierbare unterbrechungsfreie Stromversorgungstechnik)
	Management vorhandener Technik (zum Beispiel Reduktion der Vorheizung von Notstromgeneratoren)
Sonstige Ausrüstung	Bewegungsabhängige Lichtversorgung, effiziente Beleuchtung
Gebäude	Gebäudeaufbau (zum Beispiel getrennte Unterbringung wärmeabgebender Einrichtungen wie unterbrechungsfreie Stromversorgung)
	Geographische Lage (zum Beispiel Nähe zu Abnehmern für Abwärme)
	Zugang zu Wasser (zum Beispiel Nutzung von Regenwasser für Verdunstungskälte)
Monitoring, Überwachung	Messung Energienutzung und Umgebungsparameter
	Erfassung und Protokollierung Energienutzung und Umgebungsparameter
	Berichterstattung zu Energienutzung und Umgebungsparameter
	IT-Reporting (bspw. Nutzungsdaten Server, Netzwerk und Speicherung)

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J. 2021)

Insgesamt zeigt sich, dass es viele Möglichkeiten gibt, die Stromverbrauch- und Klimabilanz von Rechenzentren zu verbessern. Einige Kennzahlen und Indikatoren gibt es bereits, teilweise sind sie in der Praxis schon etabliert, um eine Orientierung zur Planung und Priorisierung von Maßnahmen

zu gewährleisten. Die bisherigen Ansätze berücksichtigen jedoch nur die Nutzungsphase, die Herstellung und Entsorgung der IT und der Gebäudetechnik werden nicht erfasst. Viele der bislang eingeführten Kennzahlen sind zudem nicht Output-orientiert, d. h. sie nehmen keinen Bezug auf die geleistete Arbeit des Rechenzentrums, was ihre Aussagekraft deutlich einschränkt.

In einem vom Umweltbundesamt geförderten Projekt wurden die Grundlagen geschaffen, bestehende Kennzahlen und Indikatoren zu vereinheitlichen und weiterzuentwickeln. Im Vorhaben „Key Performance Indicators for Data Center Efficiency (KPI4DCE)“ wurde vor allem die Ganzheitlichkeit der ökologischen Bewertung verfolgt. Im Ergebnis konnte ein praktikables Kennzahlensystem zur richtungssicheren Beurteilung der Ressourceneffizienz und der Umweltwirkungen von Rechenzentren entwickelt und die Anwendbarkeit in der Praxis erfolgreich erprobt werden (Schödwell et al. 2017).

4.6.5 Einsatz von Erneuerbaren Energien für die Stromversorgung von IKT-Infrastruktur

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten behandelten Effizienzsteigerungen bei IKT-Endgeräten und der IKT-Infrastruktur wird in der klimapolitischen Diskussion zur Digitalisierung auch vorgeschlagen, THG-Emissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren Energien für die Stromversorgung zu verringern[24].

In liberalisierten Strommärkten haben Akteure die Möglichkeit, sich gezielt für einen Stromversorger und ein spezielles Stromprodukt (bspw. ein Ökostromprodukt) zu entscheiden. Dies geschieht häufig mit der Zielsetzung, dadurch auch die Klimabilanz zu verbessern. Bei näherer Betrachtung stellen sich mehrere Fragen (Bracker und Seebach 2019):

- Zum einen besteht die grundlegende Frage, welche Anteile der Stromerzeugung mit den jeweiligen Emissionen einzelnen Akteuren, Technologien oder Sektoren zugeordnet werden können und sollen.
- Gleichzeitig ist aber auch beim Bezug eines Erneuerbaren Stromprodukts aufgrund der energiewirtschaftlichen Zusammenhänge die Frage zu beantworten, in welchem Umfang hier ein positiver Beitrag zum Ausbau der EE und zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen geleistet wird.

Mit Blick auf die Systemwirkungen des Bezugs von Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) ist zu beachten, dass der Ausbau der EE in Deutschland im Wesentlichen durch das EEG finanziert und sichergestellt wird. Um zu bewerten, welchen Beitrag der Bezug von EE-Strom durch einzelne Verbraucher zum Ausbau der EE leistet, müssen die unterschiedliche Möglichkeiten des Bezugs von Strom aus erneuerbaren Energien unterschieden werden, nämlich die Möglichkeit zur Eigenerzeugung von Strom (dies dürfte in diesem Zusammenhang eher ausgeschlossen sein) und zum Strombezug aus dem öffentlichen Netz.

Beim vertraglichen Bezug von EE-Strom handelt es sich hierbei im Regelfall lediglich um die bilanzielle Zuordnung ohnehin erzeugter EE-Mengen aus dem europäischen Ausland, zum Teil auch aus älteren deutschen Wasserkraftwerken. Durch den Bezug aus diesen Quellen wird jedoch in Anbetracht der bestehenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (insbesondere dem hohen Angebot an alter EE-Erzeugung sowie an zunehmend verfügbaren ausländischen

[24] Vergleiche bspw. die Stellungnahme des Branchenverbands bitkom im Frühjahr 2020 zur Vorstellung der Digitalagenda des BMU, https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Bitkom-zur-umweltpolitischen-Digitalagenda

geförderten EE, die im Sinne der Stromkennzeichnung mittels Herkunftsnachweisen (HKN) nach Deutschland importiert werden) kein nennenswerter Beitrag zum Ausbau der EE geleistet (Bracker und Seebach 2019). Der Bezug bestimmter Stromerzeugungsqualitäten, insbesondere der vertragliche Bezug von EE-Strom durch einzelne Akteure, trägt somit nur unter sehr bestimmten Voraussetzungen zu direkten Systemeffekten, wie einem Beitrag zum Ausbau der EE und zum Erreichen von Treibhausgas-Minderungszielen bei. Zu diesen Voraussetzungen gehören insbesondere der Ausschluss einer Doppelvermarktung und Doppelzählung sowie die Bewertung des Ambitionsniveaus. Eine detaillierte Behandlung dieser Voraussetzungen in Bezug auf die Versorgung der IKT-Infrastruktur mit EE würde den Rahmen dieser Studie sprengen, es kann aber davon ausgegangen werden, dass in der Regel der Einsatz von EE zum Betrieb der IKT-Infrastruktur nicht zu positiven Systemeffekten und damit zur Verringerung der THG-Emissionen aus dem Strombezug beiträgt.

4.7 Berechnung des CO_2-Fußabdrucks an Beispielen

In Abschnitt 3.2 wurden in vier betrachteten Sektoren digitale Technologien beschrieben, die zu Minderung von Treibhausgas-Emissionen beitragen können. Die für die jeweils eingesetzten Technologien erforderlichen Komponenten, also IKT-Endgeräte, Rechenzentren und Telekommunikationsnetze und dabei erforderlichen Energieverbräuche und THG-Emissionen konnten dabei auf der Grundlage vorliegender Daten nicht berechnet werden.

Demgegenüber wird bei den nachfolgenden Beispielen abgeschätzt, in welchem Umfang bei der (anteiligen) Herstellung und Nutzung von IKT-Geräten und IKT-Dienstleistungen wie der Nutzung von Übertragungsinfrastrukturen und Rechenzentren THG-Emissionen entstehen und wie diese im Vergleich zu dem Nutzen des Technologieeinsatzes zu bewerten sind. Die Systemgrenzen werden daher jeweils so gelegt, dass möglichst alle relevanten positiven und negativen Beiträge berücksichtigt werden. Gleichwohl haben die Beispiele nur exemplarischen Charakter und die Ergebnisse sind von den jeweils dargestellten Annahmen abhängig. Die herangezogenen Datengrundlagen für Produkte und Dienstleistungen der Informationstechnik beruhen dabei – wenn nicht anders ausgewiesen – auf der bereits in Abschnitt 4.4 dargestellten Studie von (Gröger 2020). Die Grundlagen für die einzelnen Produkte und Dienstleistungen sind im Anhang, Kapitel 7 dokumentiert.

4.7.1 HD-Videostreaming

Die Übertragung von Videos über das Internet ist derzeit ein wichtiger Treiber für den wachsenden Datenverkehr. Grundsätzlich ist bei Streamingdiensten die übertragene Datenmenge von der Art der Medieninhalte und von der Qualität bzw. Auflösung abhängig. In der nachstehenden Tabelle sind für typische Videostreaming-Dienste die pro Stunde erforderlichen Datenmengen aufgeführt.

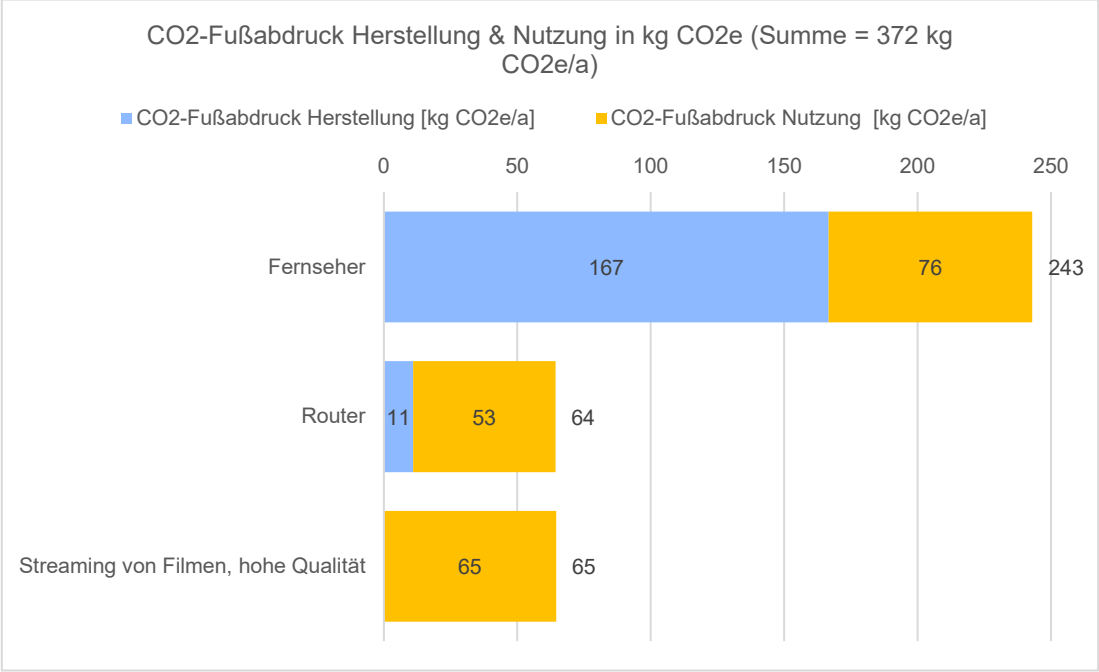
Tabelle 10: Datenmengen für Videostreaming (pro Stunde)

Datenverbrauch mit Videostreaming-Anbietern	Datenmenge pro Stunde
Netflix – niedrige Qualität	300 MB/h
Netflix – mittlere Qualität	700 MB/h
Netflix – hohe Qualität	3 GB/h
Netflix – Ultra-HD	7 GB/h
Amazon Video – Sparqualität	140 MB/h
Amazon Video – niedrige Qualität	270 MB/h
Amazon Video – mittlere Qualität	330 MB/h
Amazon Video – hohe Qualität	460 MB/h
Sky	1,7 GB/h

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Gröger 2020)

Für die weiteren Berechnungen wird von einem Streaming von Filmen in hoher Qualität mit einem Datenstrom von 2 GB/h und einer Nutzungsdauer von 3,5 Stunden pro Tag ausgegangen. Unter diesen Randbedingungen berechnet sich der jährliche CO_2-Fußabdruck mit 372 kg CO_2e. Die einzelnen Beiträge sind in der nachstehenden Abbildung zusammengefasst.

Abbildung 8: CO_2-Fußabdruck für 3,5 Stunden Fernsehen per Videostream



Quelle: Eigene Berechnungen auf der Datengrundlage von (Gröger 2020)

Knapp die Hälft der THG-Emissionen ist mit der Herstellung des Fernsehgeräts und des Routers verbunden, die andere Hälfte entfällt auf die Nutzungsphase. 118 kg CO_2e/a beruhen dabei auf der Bereitstellung der Videoinhalte und den Energieverbrauch des Routers, also mehr als die Nutzung des Fernsehgeräts selbst (76 kg CO_2e/a). THG-Emissionen in Höhe von 118 kg CO_2e/a könnten somit auch eingespart werden, wenn anstelle von „Videos on demand“ auf das Angebot des herkömmlichen konventionellen Fernsehens zurückgegriffen würde. Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass es sich um ein neueres Fernsehgerät handelt, das über einen integrierten Tuner zum Empfang von DVBT2-Signalen verfügt. Bei älteren Geräten wäre sonst eine zusätzliche

Set-Top-Box erforderlich mit zusätzlichem Energieverbrauch in Betrieb und Standby[25]. Diese zusätzlichen Geräte würden durch die Nutzung unter den hier zugrunde gelegtem Nutzungsmuster pro Jahr rund 9,4 kg CO_2e verursachen – also deutlich weniger, als durch die Nutzung des Videostreams entsteht.

Das im Zuge der Corona-Pandemie noch einmal verstärkt zunehmende Angebot an Videostreams dürfte aber die Konsumgewohnheiten stark zuungunsten des linearen Fernsehangebots verschieben. Zudem ist davon auszugehen, dass Kunden der Videostream-Anbieter mit den entsprechenden Zugangsgeräten sehr wahrscheinlich auch das früher im linearen Fernsehen wahrgenommene Angebot beispielsweise an Nachrichtensendungen zeitversetzt über den Internetzugang nutzen. Dies würde bedeuten, dass die zusätzlichen THG-Emissionen gegenüber dem konventionellen linearen Fernsehen noch höher ausfallen können. Videostreaming ist somit ein Beispiel digitaler Anwendungen, dass gegenüber dem Status Quo (hier: lineares Fernsehen) zu zusätzlichen Beiträgen an THG-Emissionen führt.

4.7.2 Home-Office / Mobiles Arbeiten

In Abschnitt 3.2.2.1 wurde bereits auf die Chancen der Digitalisierung hingewiesen, die sich durch die Einsparung von Arbeitswegen durch mobiles Arbeiten und Arbeiten im Home-Office ergeben können. Die Grundidee liegt darin, durch eine mögliche Verlagerung der Arbeit nach Hause mit Hilfe von IKT tägliche Arbeitswege zu reduzieren und damit verkehrsspezifische Treibhausgasemissionen einzusparen. In einer im Auftrag von Greenpeace durchgeführten Studie wird davon ausgegangen, dass sich der zukünftige Anteil der Telearbeit in Deutschland dem Anteil der Arbeitnehmenden im Homeoffice während des ersten Lockdowns in der Corona-Pandemie annähert – wobei gleichzeitig es für unwahrscheinlich gehalten wird, dass ein großer Teil der Arbeitnehmerinnen und Arbeitsnehmer nach Ende der Pandemie weiter in Vollzeit von zuhause arbeiten wird (Büttner und Breitkreuz 2020). Um die Spannbreite an Emissionseinsparungen zu ermitteln, werden in der Studie zwei Szenarien mit einem unterschiedlichen Telearbeit-Anteil (25 und 40 Prozent) aufgestellt und es wird unterschieden, wie viele zusätzliche Tage pro Woche im Home-Office gearbeitet wird. Im Ergebnis zeigen die durchgeführten Potenzialabschätzungen, dass je nach Annahmen große Bandbreiten an Einsparungen bestehen. Beim fortschrittlichen Szenario und zwei zusätzlichen Home-Office Tagen pro Woche beträgt das Einsparpotenzial mit 5,4 Mio. Tonnen CO_2e pro Jahr rund 18 Prozent der Emissionen des Pendelverkehrs bzw. 4 Prozent der Gesamtemissionen des Personenverkehrs in Deutschland (ebd.).

Tabelle 11: CO_2-Einsparpotenziale durch Telearbeit in Deutschland

	Konservatives Szenario (25% Telearbeit-Anteil)		Fortschrittliches Szenario (40% Telearbeit-Anteil)	
Extra Homeoffice-Tage pro Woche	Ein Tag	Zwei Tage	Ein Tag	Zwei Tage
Eingesparte Personenkilometer [Mrd.]	10,9	20,9	18,4	35,9
Emissionseinsp. pro Jahr [Mio. t CO_2e]	1,6	3,2	2,8	5,4

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von (Büttner und Breitkreuz 2020)

[25] Handelsübliche Geräte mit zusätzlichen Antennenverstärker haben nach eigener Messung eine Leistungsaufnahme von 5,75 Watt im Betrieb und 1,70 Watt im Standby.

In der zitierten Arbeit wurde auch auf mögliche Rebound- und Verlagerungseffekte hingewiesen, wobei unter Bezug auf andere Literaturquellen davon ausgegangen wurde, dass die positiven Effekte überwiegen.

Im Rahmen einer Beispielrechnung in dieser Studie wird vor diesem Hintergrund keine Abschätzung des Gesamtpotenzials, sondern eine individuelle Berechnung des CO_2-Fußabdrucks unter typischen Randbedingungen vorgenommen, um quantitative Aussagen auch mit Blick auf zusätzliche umweltrelevante Aufwendungen und mögliche Verlagerungseffekte abzuleiten. Mit Blick auf das Home-Office bzw. mobiles Arbeiten müssen hinsichtlich der IKT-Geräte und IKT-Dienstleistungen sowie des Arbeitsraums bzw. der anteilig genutzten Wohnfläche folgende Aspekte einbezogen werden:

- **IKT-Ausstattung im Home-Office:** Im einfachsten Fall wird hier das vorhandene Laptop aus der Arbeit mitgenommen und zuhause genutzt; bei der unterstellten häufigeren und intensiveren Nutzung wird (neben Equipment wie zweiter Docking-Station, Maus und Tastatur, dieses wird hier für die Berechnung nicht berücksichtigt) häufig ein zusätzlicher Monitor beschafft. In manchen Fällen wird im Home-Office auch ein zusätzlicher Destop-PC mit Monitor und ein Arbeitsplatz-Drucker eingesetzt. Um diese Bandbreite abzubilden, wird bei der Berechnung in zwei Szenarien von unterschiedlichen Ausstattungsvarianten ausgegangen (siehe unten).

- **Zusätzlicher Datenverkehr:** Für das Arbeiten von zuhause wird angenommen, dass regelmäßig Daten mit dem Rechenzentrum bzw. Serverraum des Arbeitgebers ausgetauscht oder andere Cloud-Dienstleistungen genutzt werden. Auf der Grundlage einer im Spätherbst 2020 vorgenommenen Auswertung von 16 Heimarbeitsplätzen beim Öko-Institut wird für die Berechnungen von einer Datenmenge von 4 Gigabyte pro Tag bzw. 0,5 Gigabyte pro Arbeitsstunde (bei einem angenommenen 8-Stunden-Arbeitstag) ausgegangen. Bei diesem Wert handelt es sich um einen Durchschnittswert abhängig von der jeweiligen Tätigkeit und der Intensität der Nutzung von datenintensiven Diensten (z.B. Videokonferenzen, Cloud-Speicherung, Software-as-a-Service), kann dieser Wert je nach Home-Office-Arbeitsplatz stark variieren.

- **Beleuchtung und Raumwärmebedarf:** Eine schwierige Frage ist, ob und in welchem Umfang durch das Arbeiten von zuhause tatsächlich eine zusätzliche Beleuchtung und ein zusätzlicher Raumwärmebedarf berücksichtigt werden muss. Dies wäre zumindest dann der Fall, wenn ein sonst nicht beheizter und beleuchteter gesonderter Raum für das Arbeiten von zuhause genutzt wird, wobei bei Nutzung über längere Zeiträume tatsächlich davon ausgegangen werden kann, dass Arbeiten von zuhause nicht nur „in der Ecke des Wohnzimmers“ erfolgt. Um die mögliche Bandbreite abzubilden, wird die Beleuchtung und der Raumwärmebedarf bei den beiden Szenarien unterschiedlich behandelt.

In der nachstehenden Tabelle sind die den Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen in zwei Szenarien zusammengefasst; Szenario 1 stellt damit eine Minimalvariante dar, Szenario 2 bildet einen komplett ausgestatteten Arbeitsplatz im Heimbüro ab.

Tabelle 12: Definition von Szenarien zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks für Home-Office / Mobiles Arbeiten

	Szenario 1	Szenario 2
IKT-Geräteausstattung	Nutzung des Laptops, Nutzung des Routers, zusätzlicher Monitor	Desktop-PC, Monitor, Router, Drucker
IKT-Nutzung	220 Arbeitstage pro Jahr, acht Stunden pro Arbeitstag, 4 GB Datenmenge pro Tag	
Beleuchtung und Beheizung Arbeitsraum	entfällt	Arbeitsraum mit 12 m² Fläche, Beleuchtung: 50 Watt a 8 Stunden, Heizwärmebedarf 105 kWh_{th}/m^2*a) – hälftig angerechnet auf die berufliche Nutzung

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die unter den beschriebenen Szenarien resultierenden THG-Emissionen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt – alle Zahlenwerte beziehen sich auf ein Arbeitsjahr mit 220 Arbeitstagen und einer Vollzeitstelle mit acht Stunden täglicher Arbeitszeit. Es zeigt sich, dass die jährlichen CO_2e-Emissionen nach den getroffenen Annahmen sich zwischen knapp 100 kg und über 400 kg um mehr als Faktor 4 unterscheiden. Von hohem Einfluss sind dabei beim zweiten Szenario die Herstellung der IKT-Endgeräte mit 25 Prozent der gesamten THG-Emissionen und in der Nutzungsphase die Beleuchtung und vor allem die Beheizung des Arbeitszimmers. Aber auch die unterstellte Minimalvariante in Szenario 1 führt zu THG-Emissionen in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung.

Tabelle 13: CO_2-Fußabdruck für Home-Office / Mobiles Arbeiten für zwei Szenarien – alle Zahlenangaben in kg CO_2e pro Jahr (220 Arbeitstage)

	Szenario 1		Szenario 2	
Herstellung PC und Monitor	-	-	87,0	19,6%
Herstellung Monitor	17,6	18,5%	-	-
Herstellung Router	-	-	11,0	2,5%
Herstellung Drucker	-	-	13,2	3,0%
Summe Herstellung	*17,6*	*19%*	*111,2*	*25%*
Nutzung Laptop oder PC	14,0	14,7%	75,0	16,9%
Nutzung Monitor	38,7	40,7%	-	-
Nutzung Router	-	-	32,1	7,3%
Nutzung Drucker	-	-	31,0	7,0%
Nutzung Internet / Datenverkehr	24,7	26,0%	24,7	5,6%
Beleuchtung Home-Office	-	-	41,2	9,3%

	Szenario 1		Szenario 2	
Beheizung Home-Office	-	-	127,9	28,9%
Summe Nutzung	*77,4*	*81,5%*	*331,8*	*74,9%*
Gesamt	95,0	100,0%	443,0	100,0%

Quelle: Eigene Berechnungen, siehe Text

Zur Einordnung dieser Ergebnisse ist auch ein Blick auf dadurch vermiedene THG-Emissionen interessant. Bei einer angenommenen einfachen Entfernung zum regulären Arbeitsort von 10 km berechnen sich diese wie folgt:

- Pkw-Nutzung (einfach besetzt): 647 kg CO_2e/a
- Nutzung ÖPNV: 304 kg CO_2e/a

Zusammenfassend bedeutet dies: sofern bei einem Arbeitsweg von 10 km nicht ein emissionsfreies Verkehrsmittel wie das Fahrrad genutzt wird, trägt mobiles Arbeiten von zuhause bei beiden angenommenen Szenarien zu einer Minderung von THG-Emissionen bei. Bei einem voll ausgestatteten und beheizten Heimbüro trifft dies unter den hier getroffenen Annahmen allerdings nur unter der Voraussetzung zu, dass dadurch die Pkw-Fahrt ins reguläre Büro ersetzt wird oder bei Nutzung des ÖPNV die zurückgelegte Fahrstrecke mehr als 15 km beträgt.

4.7.3 Videokonferenzen im beruflichen Kontext

Im Zuge der Corona-Pandemie haben auch Videokonferenzen im beruflichen Kontext einen wesentlichen Schub erhalten und gelten in vielen Unternehmen inzwischen zum täglichen Standard. Videokonferenzen können aus sehr unterschiedlichen Gründen geführt werden:

- Es kann sich zeitlich gesehen um eher kurze Videokonferenzen zur Abstimmung von Arbeitsprozessen mit wenigen Teilnehmerinnen und Teilnehmern handeln, die damit eher den Charakter einer Videotelefonie haben.
- Zunehmend werden auch große Fachkonferenzen gänzlich als Videokonferenzen oder als sogenannte Hybridveranstaltungen durchgeführt, bei denen beispielsweise Referentinnen und Referenten und Moderation vor Ort anwesend sind und das Auditorium gänzlich online teilnimmt.

Neben diesen beiden Varianten gibt es eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten, Videokonferenzen einzusetzen und auszugestalten. Bei der nachfolgenden exemplarischen Berechnung des CO_2-Fußabdrucks werden daher drei mögliche Szenarien abgebildet:

- Tägliche Teilnahme an einer einstündigen Videokonferenz mit Laptop per LAN / WLAN.
- Tägliche Teilnahme an einer einstündigen Videokonferenz mit dem Smartphone über Mobilfunknetze.

- Vierteljährlicher Besuch einer virtuellen Fachkonferenz mit sechs Stunden Dauer per Laptop, dabei jeweils drei Stunden Videostream in hoher Qualität[26].

Bei Szenario 1 und 2 ist der Unterschied zwischen den beiden Szenarien durch die unterschiedliche Nutzung des Internetzugangs von Relevanz, eine Bezugnahme auf eingesparte Wegstrecken ist ohne einen spezifischen Kontext schwer zu begründen. Bei Szenario 3 erfolgt demgegenüber eine Bezugnahme zu den eingesparten Berufsreisen zu den Fachkonferenzen. Dabei wird eine Anfahrt mit dem Pkw zum Bahnhof mit 10 km und eine Reise im Fernverkehr der Bahn mit 300 km angenommen (jeweils eine Wegstrecke). Im Unterschied zu den beiden vorangegangenen beispielhaften Berechnungen wird hier nur die Nutzungsphase betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass zur Durchführung der Videokonferenzen keine dezidierte Hardware beschafft wird[27].

In der nachstehenden Tabelle werden für die drei definierten Szenarien jeweils die Ergebnisse mit den einzelnen Beiträgen dargestellt.

Tabelle 14: CO_2-Fußabdruck Videokonferenzen im beruflichen Kontext – alle Zahlenangaben in kg CO_2e pro Jahr (220 Arbeitstage)

Szenarien	Beitrag	THG-Emissionen
Szenario 1: Videokonferenz per Laptop kabelgebundenen Internetzugang (1h/d)	Nutzung Laptop	6,0
	Nutzung kabelgebundenes Internet	3,0
	Gesamt	**9,0**
Szenario 2: Videokonferenz per Smartphone und Mobilfunknetz (1h/d)	Nutzung Smartphone	3,0
	Nutzung mobiles Internet	12,7
	Gesamt	**15,7**
Szenario 3: Virtuelle Fachkonferenzen (Vier Konferenzen pro Jahr mit sechs Stunden Dauer)	Nutzung Laptop	5,0
	Nutzung kabelgebundenes Internet	0,6
	Gesamt	**5,6**
	Ersparte Anfahrt / Rückfahrt Bahnhof	11,8
	Ersparte Bahnreisen Fernverkehr	76,8
	Gesamt	**88,6**

Quelle: Eigene Berechnungen, siehe Text

[26] Bei Videokonferenzen wird erfahrungsgemäß nur zeitweise ein Videostream in hoher Qualität übertragen, beispielsweise wenn ein interaktives graphisches Tool wie Miro-Board genutzt wird. Die Übertragung von einfachen Präsentationsinhalten erfordert demgegenüber geringere Datenübertragungsraten. Für die Abschätzung wurde daher angenommen, dass nur für die Hälfte der Konferenzzeit ein Videostream in hoher Qualität übertragen wird.

[27] Besprechungsräume in Unternehmen und Organisationen werden allerdings in jüngster Zeit zunehmend mit Videokonferenzsystemen ausgerüstet, die über spezielle Audiotechnik und große Displays verfügen. Diese Hardware-Ausstattung würde dann näherungsweise der Herstellung und Nutzung von TV-Geräten entsprechen, vgl. dazu Abschnitt 4.7.1.

Der Vergleich von Szenario 1 und 2 zeigt den hohen Energieaufwand bei Nutzung des Mobilfunknetzes. Zwar kann bei Szenario 2 mit der Nutzung des Smartphones gegenüber einem Laptop in Szenario 1 durch den wesentlich geringeren Energieverbrauch in der Nutzung die THG-Emissionen der Gerätenutzung halbiert werden. Die Nutzung des mobilen Internets führt aber gegenüber dem kabelgebundenen Internetzugang zu einer Vervierfachung der THG-Emissionen, so dass Szenario 1 gegenüber Szenario 2 signifikant besser abschneidet. Szenario 3 verdeutlicht das sehr hohe Einsparpotenzial bei Durchführung von virtuellen Konferenzen gegenüber Präsenzveranstaltungen. Bei pro Jahr vier virtuell durchgeführten Fachkonferenzen liegen die THG-Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Konferenzen mit Anreise an den Veranstaltungsort lediglich bei 6 Prozent. Der Abstand wäre noch größer, wenn für den Konferenzbesuch anstelle der Anreise mit der Bahn ein Inlandsflug angesetzt würde: allein der Beitrag dieser Anreise würde gut eine halbe Tonne CO_2e pro Jahr ausmachen.

4.8 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf der Grundlage der Literatur ein Überblick zum Energieverbrauch und zu den THG-Emissionen gegeben, die mit der Anwendung digitaler Technologien in Deutschland verbunden sind. Dieser Überblick schließt sowohl die digitalen Endgeräte in Haushalten und Unternehmen als auch die digitalen Infrastrukturen, wie Rechenzentren und Telekommunikationsnetze (Festnetze und Mobilfunknetze) ein. Auf dieser Grundlage kann der jährliche Strombedarf in Deutschland auf ca. 45 bis 50 TWh pro Jahr abgeschätzt werden. Während bei den Endgeräten von einem abnehmenden bis gleichbleibenden Trend im Energieverbrauch ausgegangen wird, wird übereinstimmend in vielen Quellen bei Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen ein steigender Verbrauch prognostiziert. Bei diesem Anstieg wird einerseits angenommen, dass Minderungspotenziale durch Leistungsverbesserung auf Komponentenebene genutzt werden und auch softwareseitig die Energieeffizienz verbessert wird. Andererseits wird, und das bereits vor der Corona-Pandemie, von einer intensiveren Internetnutzung ausgegangen, u.a. getrieben durch das Streaming von hochauflösenden Videos. Weitere Treiber der Entwicklung eines steigenden Energiebedarfs der Telekommunikationsnetze und Rechenzentren sind das Internet der Dinge und perspektivisch autonomes Fahren.

Die derzeitigen durch die Digitalisierung in Deutschland verursachten THG-Emissionen können auf rund 34 Mio. Tonnen CO_2e pro Jahr abgeschätzt werden. Gemessen an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland in 2019, dem letzten Jahr vor der Corona-Pandemie mit rund 805 Mio. Tonnen CO_2e, entspricht dies einem Anteil von rund 4,1 Prozent. Dabei fallen die THG-Emissionen aus dem Herstellungsaufwand von IKT-Endgeräten und der IKT-Infrastruktur in großen Teilen außerhalb Deutschlands an. Bei der Interpretation der vorgenommenen Abschätzung ist zudem zu beachten, dass die zugrunde gelegten Literaturdaten zum Strombedarf auf Grund der dynamischen Entwicklung des IKT-Sektors inzwischen als überholt angesehen werden, d.h. die durchgeführte Abschätzung dürfte die tatsächlichen THG-Emissionen eher unter- als überbewerten. Für diese Einschätzung sprechen auch die Ergebnisse von Berechnungen des individuellen digitalen CO_2-Fußabdrucks, dieser liegt in einer Bandbreite zwischen 740 und 1.050 kg CO_2e / pro Jahr bzw. 6,7 bis 9,5 Prozent der Pro-Kopf-Emissionen an Treibhausgasen in Deutschland.

An den Beispielen HD-Videostreaming, Home-Office / Mobiles Arbeiten und Videokonferenzen kann abgeschätzt werden, in welchem Umfang bei der (anteiligen) Herstellung und Nutzung von IKT-Geräten und IKT-Dienstleistungen THG-Emissionen entstehen und wie diese im Vergleich zu dem Nutzen des Technologieeinsatzes zu bewerten sind, d.h. alle relevanten positiven und negativen

Beiträge werden berücksichtigt. Die Fallbeispiele zeigen, dass unter Heranziehung von Basisdaten für häufig eingesetzte IKT-Endgeräte und IKT-Dienstleistungen die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks möglich ist. Die Schwierigkeiten liegen eher bei der Interpretation, Einordnung und ggf. Hochrechnung von Ergebnissen zu Gesamtpotenzialen. Dies kann an allen drei Beispielen wie folgt verdeutlicht werden:

- Videostreaming ist eine neue digitale Dienstleistung, die es ermöglicht, aus einem großen Angebot an Filmen zeitunabhängig und sofort, „on demand“ und ohne den Aufwand zur Beschaffung eines Datenträgers Videos zu konsumieren. Gegenüber bisherigen Möglichkeiten, also der vom Anbieter und der Sendezeit abhängigen Bereitstellung eines Films im linearen Fernsehen oder der aufwendigen Beschaffung aus einer Videothek, ermöglichen die Amazon, Netflix, Disney und andere einen anders gestaltbaren Konsum, den es in dieser Form und Intensität vorher nicht gab, weshalb es auch kein eigentliches Referenzszenario gibt. Videostreaming ist also eine digitale Technologie, die kein bestehendes Konsummodell substituiert, sondern neue Konsummöglichkeiten ermöglicht – mit dem Preis, zusätzlicher THG-Emissionen.

- Bei mobilem Arbeiten / Home-Office kommt es sehr stark auf die Ausgestaltung an, ob tatsächlich gegenüber der Präsenzarbeit im Büro in signifikantem Umfang THG-Emissionen eingespart werden können. Insbesondere solange parallele Strukturen aufrechterhalten und entsprechende Geräteausstattungen bereitgestellt werden und nicht in nennenswerten Umfang Arbeitswege eingespart werden, sind die erreichbaren THG-Emissionsminderungspotenziale gering.

- Demgegenüber können Videokonferenzen, durch die lange Dienst-/ Geschäftsreisen vermieden werden können, in erheblichem Umfang zur Einsparung von THG-Emissionen beitragen; dies auch unter der hier unterstellten Situation, dass in virtuellen Konferenzen Videos in hoher Auflösung übermittelt werden.

Die allgemeine Entwicklung zum Energiebedarf und den damit verbundenen THG-Emissionen aus der Nutzung von IKT-Endgeräten, Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen in Deutschland und die drei konkreten Fallbeispiele mit Berechnung des CO_2-Fußabdrucks verdeutlichen die Ambivalenz der gegenwärtigen Entwicklung. Zwar bieten digitale Technologien in vielen Sektoren Chancen, ambitionierte Klimaziele zu erreichen, vgl. Abschnitt 3.2. Diesen Chancen stehen jedoch erhebliche Risiken gegenüber, bedingt durch den wachsenden Energie- und Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Diese Risiken ergeben sich aus den hier untersuchten direkten Effekten durch Herstellung und Nutzung von IKT-Endgeräten und der IKT-Infrastruktur, aber auch durch indirekte Auswirkungen infolge von Rebound- und Induktionseffekten. Dies gilt insbesondere für digitale Anwendungen, die keine bestehenden Angebote ersetzen, sondern neue Konsummöglichkeiten mit zusätzlichen THG-Emissionen ermöglichen. Sowohl zur Wahrnehmung der Chancen als auch zur Eindämmung der Risiken braucht es daher eine effektive und kohärente politische Steuerung.

5 Wie steuern: Politische Instrumente zur klimaneutralen Ausrichtung der Digitalisierung

In jüngster Zeit ist die sozial-ökologische Ambivalenz der Digitalisierung zunehmend in das öffentliche Interesse gerückt. Die Digitalisierung und digitale Anwendungen sind per se weder nachhaltig noch sozial-ökologisch problematisch. In Kapitel 3.2 haben wir an acht Anwendungsbeispielen die großen Potenziale der Digitalisierung für den Klimaschutz aufgezeigt. Umgekehrt bestehen auch erhebliche Risiken. Auch wenn mit Blick auf die Datenbasis bei den direkten Effekten der Digitalisierung Lücken bestehen, gehen wir davon aus, dass ohne einen entsprechend ausgerichteten regulatorischen Rahmen die direkten Auswirkungen der Digitalisierung mit Blick auf THG-Emissionen zunehmen werden, vgl. Abschnitt 4.8. Das Bewusstsein für diese Ambivalenz erklärt das wachsende Interesse an umweltpolitischen Instrumenten: Rechtliche und politische Instrumente können als Mittel der „Technik- und Innovationsermöglichung“ helfen, Potenziale für die Nachhaltigkeit auszuschöpfen; andererseits muss gerade das Recht angesichts der Risiken des Klimawandels in seiner Funktion als Schutz- und Vorsorgerecht aktiviert werden (Hoffmann-Riem 2016). Die Frage, ob Digitalisierung zum Brandbeschleuniger sozialer und ökologischer Krisen oder zum Werkzeugkasten für eine nachhaltige Zukunft wird (BMU 2020), wird maßgeblich auch dadurch entschieden werden, ob eine effektive umweltpolitische Steuerung gelingt.

Diese Bedeutung, insbesondere auch klimaschutzpolitischer Steuerung, spiegelt sich in einer hohen Zahl an Initiativen im Kontext der Digitalisierung auf allen Regelungsebenen wider. Rechtspolitische Vorschläge, Strategien oder entsprechende Findungsprozesse sind für Kommunen ebenso von Bedeutung, wie für die europäische und internationale Politik. Eine erhebliche regulatorische Dynamik können auch nationale oder transnationale Brancheninitiativen, oder Kooperationen zwischen Politik und Wirtschaft entwickeln. Solche Strategien und Initiativen können auf sehr grundlegende Weichenstellungen für die Entwicklung oder den Betrieb digitaler Anwendungen und Geschäftsmodelle abzielen, wie etwa eine Daten-, Plattform-, oder Algorithmenregulierung. Häufig werden Regulierungsinstrumente aber auch spezifische Aspekte bestimmter Anwendungen oder Sektoren betreffen, etwa wo es um Verbote oder die Einhaltung konkreter hoheitlich festgelegter Vorgaben zur Daten- oder Energieeffizienz von Technologien oder Anwendungen geht.

Die dementsprechend große und schnell sich weiter erhöhende Vielfalt umweltpolitischer und rechtlicher Handlungsmöglichkeiten kann die vorliegende Untersuchung nicht erschöpfend abbilden. Der Vielfalt und Dynamik tragen wir stattdessen dadurch Rechnung, dass wir einerseits durch die Unterscheidung unterschiedlicher Typen der Steuerung einen breiten Überblick über wichtige Handlungsoptionen zur Ausrichtung der Digitalisierung an Nachhaltigkeitszielen und Klimaschutz schaffen. Diese eher abstrakte Betrachtung wird andererseits durch die Bezugnahme auf Beispiele für bestehende oder denkbare Steuerungsmöglichkeiten aus den vorangegangenen Kapiteln veranschaulicht. Durch diese konkreten Beispiele werden, wo vorhanden, zudem bereits existierende oder sich abzeichnende Instrumente im Projektkontext hervorgehoben. Wir unterscheiden in diesem Sinne zwischen einer „analogen“ Kontextregulierung, ordnungsrechtlichen Vorgaben für digitale Anwendungen sowie Ansätzen der Algorithmenregulierung und der Datenregulierung. Auf die gesonderte Darstellung eines Handlungsansatzes, der sich auf die finanzielle Förderung der Forschung, Entwicklung, oder Nutzung besonders sinnvoller Anwendungen fokussiert, wird im vorliegenden Zusammenhang dagegen verzichtet.

5.1 Kontextregulierung: „Analoge“ Rahmenbedingungen für digitale Anwendungen und Geschäftsmodelle anpassen

Als Kontextregulierung können im vorliegenden Zusammenhang politische Handlungsansätze verstanden werden, die auf die vielfältigen Auswirkungen und Potenziale der Digitalisierung mit der Anpassung der bestehenden Rahmenbedingungen für eben diejenigen Sektoren oder Handlungszusammenhänge reagiert, in denen die Auswirkungen wirksam werden oder konkrete neue Potenziale gesehen werden. Eine Kontextregulierung setzt also nicht unmittelbar Regeln für die Entwicklung oder die Betriebsweise von Soft- oder Hardware und befasst sich direkt weder mit digitalen Medien noch mit digitalen Daten. Sie soll vielmehr die Regeln und Bedingungen für die Gesellschaftsbereiche, in denen digitale Anwendungen entwickelt, produziert und genutzt werden, in der Weise anpassen, dass neue Risiken adressiert und neue Potenziale gehoben werden können. Kontextregulierung wird hier also als Überbegriff für Möglichkeiten der Adaptation der regulatorischen „Umwelt“ der digitalen Anwendungen und Geschäftsmodelle verstanden.

Beispiele für eine solche Anpassung des bestehenden Regulierungsrahmens an neue Risiken und Potenziale sind ebenso vielfältig wie die neuen Einsatzmöglichkeiten und Effekte digitaler Technologien. Ein regulatorischer Umgang mit Risiken in diesem Sinne wird häufig in einer Anpassung des ordnungsrechtlichen Rahmens liegen. Ein naheliegender Anwendungsfall für eine Kontextregulierung kann beispielsweise in der Anpassung der straßenrechtlichen und straßenverkehrsrechtlichen Regeln für den Kfz-Verkehr gesehen werden, durch die mit einem durch die Nutzung von Navigationsgeräten veränderten Verkehrsverhalten umgegangen wird. In Abhängigkeit von ihren Algorithmen werden Navigationssysteme häufig zwar den kostengünstigsten oder schnellsten Transportweg für Waren oder Personen finden, der aber zugleich auch der umweltschädlichste ist (vgl. dazu Zweig 2019). Darauf, dass Verkehrsteilnehmer massenhaft Wege einschlagen, die aus Klimaschutzerwägungen oder anderen Gemeinwohlbelangen nachteilig sind, können Kommunen durch eine Veränderung der Beschilderung – etwa durch die Aufstellung des Verkehrszeichens „Anlieger frei“ – reagieren, die auch durch Navigationssysteme berücksichtigt werden müssen.[28] Die Frage, ob solche Ansätze effektiv sind, wird sich nur im Hinblick auf den konkreten Einzelfall beantworten lassen.

Eine Kontextregulierung in diesem Sinne kann auch darauf abzielen, die Erfolgsaussichten für nachhaltige Innovationen zu verbessern, indem rechtliche Anreizstrukturen und Marktbedingungen auf die neuen Entwicklungen hin angepasst werden. „Grüne“ Beschaffungspraktiken können beispielsweise erhebliche Anreize zur Entwicklung und zum Einsatz klimaschonender Technologien schaffen. So sieht die Digitalagenda des BMU veränderte Vorgaben zur klimafreundlichen Beschaffung des Bundes vor. Mit diesen Vorgaben soll eine verbesserte Berücksichtigung der ökologischen Auswirkungen der Herstellungs-, Nutzungs-, Verwertungs- und Entsorgungsphasen vor strategischen Entscheidungen zum IT-Einsatz des Bundes erreicht werden (BMU 2020, S. 10). Um die Steuerungspotenziale des Beschaffungswesens weiter zu verbessern, wird in einer vom BMU beauftragten Studie des European Policy Centre auch eine Anpassung der europarechtlichen Rahmenbedingungen vorgeschlagen: so sollen die EU-Richtlinien über die öffentliche Beschaffung angepasst werden, um verbindliche Vorgaben für die Beschaffung von Elektro- und Elektronikgeräten, Kriterien zur Bewertung der Fortschritte im Bereich der „grünen Beschaffung“ auf EU-Ebene und entsprechende Praktiken der Mitgliedsstaaten zu schaffen und eine verpflichtende Berichterstattung über nachhaltige Beschaffung durch die Mitgliedstaaten an die Kommission zu etablieren (Hedberg und Šipka 2020). Grundsätzlich können auch strukturelle ökonomische

[28] https://www.sueddeutsche.de/muenchen/schwabing-ploetzlich-transit-strecke-1.4098216.

Weichenstellungen, wie etwa eine CO_2-Bepreisung, oder Steuerentlastungen für besonders nachhaltige Technologien als Kontextregulierung in diesem Sinne verstanden werden: auch diese sollen Anreize zur Entwicklung und Nutzung innovativer Technologien schaffen, indem sie Nachfrage und Marktchancen für nachhaltige Innovationen erhöhen.

5.2 Zielvorgaben und Standards für Entwicklung und Betrieb digitaler Anwendungen – „Greening IT“

Umweltpolitische Steuerungsinstrumente können demgegenüber auch darauf abzielen, Energieverbräuche und Klimawirkungen bei Herstellung und Betrieb konkreter digitaler Anwendungen zu minimieren. Im vorliegenden Kontext kann dies insbesondere durch die Schaffung quantifizierter, ggf. sektorspezifischer Standards und Ziele für die Energieeffizienz und/oder den absoluten Energieverbrauch bestimmter Technologien erreicht werden. Für die **verbindliche Regelung von Zielvorgaben** und Standards kommen demgegenüber etwa die Entwicklung von Ökodesign-Anforderungen für relevante Produktgruppen in Betracht. Im Rahmen der Ökodesign-Richtline der EU werden beispielsweise Mindestanforderungen an die Energieeffizienz für energieverbrauchsrelevante Produkte im gemeinsamen Binnenmarkt der Europäischen Union festlegt. Eine Übersicht zum Stand der konkreten Regulierung mit Bezug zur Digitalisierung wird mit der nachstehenden Tabelle gegeben.

Tabelle 15: Anforderungen auf der Grundlage der Ökodesign-Richtlinie der EU für relevante Produktgruppen im Kontext der Digitalisierung

Verordnung	Anwendungsbereich	Ausnahmen	Anforderungen hinsichtlich
(EU) 617/2013	Desktop-Computer, integrierte Desktop-Computer, Notebook-Computer (einschließlich Tablet-Computern, Slates und mobiler Thin-Clients), Desktop-Thin-Clients, Workstations, mobile Workstations, Small-Scale-Server, Computerserver	Blade-Systeme und -Komponenten, Server-Appliances, Multi-Node-Server, Computerserver mit mehr als vier Prozessorsockeln, Spielekonsolen, Dockingstations	Gesamtenergieverbrauch, Ruhezustand, Stromverbrauch im Niedrigstverbrauchszustand und im Aus-Zustand, Effizienz interner Netzteile, Verbrauchsminderungsfunktion, Produktinformationen
(EG) 642/2009	Fernsehgeräte	keine	Leistungsaufnahme im Ein-Zustand, im Bereitschafts-/Aus-Zustand im vernetzten Bereitschaftsbetrieb, Abschaltautomatik, Heim-Zustand, Spitzenluminanzverhältnis, Produktinformationen
(EU) 1062/2010	Fernsehgeräte	keine	Energieverbrauchskennzeichnung, Produktdatenblatt
(EU) 2019/2021	Fernsehgeräte, Monitore, Signage-Displays	Displays < 100cm², Projektoren, Videokonferenzsysteme, medizinische Anwendungen, VR-Brillen, viele integrierte Displays	Energieeffizienzanforderungen, Anforderungen an Aus-Zustand sowie (vernetztem) Bereitschaftszustand, Materialeffizienzanforderungen, Produktinformationen, Softwareaktualisierungen
(EU) 2019/2013	Fernsehgeräte, Monitore, bestimmte Signage-Displays	Displays < 100cm², Projektoren, Videokonferenzsysteme, medizinische Anwendungen, VR-Brillen, viele integrierte Displays, Broadcast- und Sicherheitsanwendungen, Whiteboards, Fotorahmen, Status- und Bediendisplays	Energieverbrauchskennzeichnung, Produktdatenblatt

Verordnung	Anwendungsbereich	Ausnahmen	Anforderungen hinsichtlich
(EG) 1275/2008	elektrische und elektronische Haushalts- und Bürogeräte in der Liste in Anhang I der Verordnung	elektrische und elektronische Haushalts- und Bürogeräte mit Niederspannungsnetzteil	Stromverbrauch im Aus- und Bereitschaftszustand, Bereitschafts- oder Ruhefunktion, Verbrauchsminimierungsfunktion, Verbrauch vernetzter Geräte, vernetzter Bereitschaftsbetrieb, Produktinformationen
(EU) 801/2013	Verbrauch im vernetzten Bereitschaftsbetrieb (networked stand-by) bei Kaffeemaschinen und Fernseher	keine	Entfällt, da horizontale Maßnahme
(EU) 2019/424	Server, Online-Datenspeicherprodukte	Server für eingebettete Anwendungen Small-Scale Server nach VO 617/2013 Server mit mehr als 4 Prozessorsockeln Server-Appliances, Großserver vollständig fehlertolerante Server Netzwerkserver (mehr als 11 Netzwerkports) kleine Datenspeicherprodukte, große Datenspeicherprodukte	Netzteil-Wirkungsgrad Austauschbarkeit bestimmter Komponenten Datenlöschung Verfügbarkeit von Firmwareupdates Leistung im Leerlaufzustand Effizienz im Aktivzustand Informationspflichten
-	Bildgebende Geräte (Drucker, Scanner, Kopierer…)	Selbstregulierungsvereinbarung der Hersteller	
-	Spielkonsolen	Selbstregulierungsvereinbarung der Hersteller	
-	Komplexe Set-Top-Boxen	Selbstregulierungsvereinbarung der Hersteller	

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage von BAM Netzwerke (https://netzwerke.bam.de/Netzwerke/Navigation/DE/Evpg/EVPG-Produkte/Elektronik/evpg-elektronik.html, zuletzt geprüft 22.12.2020

Neben den in der Tabelle aufgeführten Produktgruppen gibt es mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen und Geräten für intelligente Stromnetze (Smart Appliances) zwei weitere Produktgruppen mit Relevanz hinsichtlich Digitalisierung, die zwar eingehend in Vorbereitungsstudien im Kontext der EU-Ökodesign-Richtline untersucht wurden, für die aber keine Verordnungen erlassen wurden, in der Regel aus Gründen der Komplexität. Derzeit wird in einer umfassenden Studie der Arbeitsplan für weitere mögliche Maßnahmen zur Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie erarbeitet. Konkrete Produktgruppen bzw. Sachverhalte mit Bezug zur Digitalisierung sind hier[29]:

- Netzwerkequipment für Haushalte und kleine Büros
- Vernetzte Audio- und Videogeräte und Sprachassistenten
- Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (als Wiedervorlage für den Arbeitsplan der Jahre 2020 bis 2024)
- Drohnen und Quadrocopter
- Basisstationen einschließlich Subsysteme

Neben den auf einzelne Produktgruppen ausgerichteten Verordnungen gibt es von der EU-Kommission auch Bestrebungen, komplexere Sachverhalte zu regulieren. Als konkretes Beispiel für spezifische Regelungen in dieser Hinsicht könnten Betreiber von Rechenzentren etwa auch zur Nutzung von Abwärme als nutzbare Energiequelle verpflichtet werden (cf. Liu et al. 2019, S. 17). Im Rahmen der deutschen EU-Ratspräsidentschaft im zweiten Halbjahr 2020 wurde auch die Etablierung von Nachhaltigkeitsstandards für Distributed-Ledger-Technologien (Blockchain-Technologien) empfohlen (Hedberg und Šipka 2020). Mit Blick auf das Projekt Gaia-X, das die deutsche Bundesregierung auf europäischer Ebene initiiert hat, sollen im Einklang mit den Klimaschutzzielen des Green Deal verbindliche technologische Standards auch hinsichtlich der Energieeffizienz für europäische Cloud-Dienste gesetzt werden. Cloud-Rechenzentren im GAIA-X-Verbund müssen demnach höchste Ansprüche an Energieeffizienz und Ressourcenschonung genügen (Gröger et al. 2020). Jüngere Entwicklungen in der Forschung zu maschinellem Lernen zeigen auf, dass sich Anforderungen an ein energieeffizientes Design digitaler Anwendungen grundsätzlich etwa auch auf erheblich energieeffizientere Methoden zum Training von KI-Systemen beziehen könnten.[30]

Entsprechende Normen können zum anderen auch als **unverbindliche Standards** festgelegt werden, die Umweltzeichen und Zertifikaten zugrunde liegen. Das Umweltzeichen Blauer Engel wurde dementsprechend bereits um vier weitere Produktgruppen erweitert: im Einzelnen können nunmehr ein energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb, klimaschonende Co-Location-Rechenzentren, ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte, Server und Datenspeicherprodukte ausgezeichnet werden (BMU 2020). Der EU „Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency“ fasst Maßnahmen für Entwicklung, Bau und Betrieb von Rechenzentren zusammen, die Betreiber dabei unterstützen sollen, Optionen zur Verbesserung der Energieeffizienz zu identifizieren und umzusetzen (Acton et al. 2020). Entsprechende Standards, Nachweise und Zertifikate können wiederum im Kontext von Vorgaben für eine „grüne Beschaffung“ eine Rolle spielen und als Orientierung für gezielte Investitionsprogramme dienen.[31]

[29] Siehe Webseite der mit der Studie beauftragten Consultants: https://4b53564a-99a6-428e-9c2f-c6596d6ff2ec.usrfiles.com/ugd/4b5356_700a94e782ac4f5a9f171a563439a73d.pdf, zuletzt geprüft 22.12.2020
[30] Vgl. https://news.mit.edu/2020/artificial-intelligence-ai-carbon-footprint-0423
[31] So etwa im KfW-Programm Klimaschutzoffensive für den Mittelstand.

Eine besondere Herausforderung für entsprechende Interventionsstrategien ist es allerdings, mit der Innovationsdynamik der technologischen Entwicklungen Schritt zu halten. Um dies zu gewährleisten, könnte eine intensivierte Zusammenarbeit von Behörden und Expertengremien wie DIN und CEN-CENELEC in einem „fast-track" Verfahren institutionalisiert werden. Programme und Fonds auf europäischer Ebene (wie Horizon und das Digital Europa Programme) sollten dazu genutzt werden, um die Entwicklung von Standards für sich schnell weiterentwickelnde Unterhaltungselektronik zu ermöglichen (Hedberg/Sipka, 2020).

Box 3: Verknüpfung von Förderprogrammen mit Anforderungen an nachhaltiges Wirtschaften

Ein weiteres politisches Instrument zur klimaneutralen Ausrichtung der Digitalisierung ist die Verknüpfung von Förderprogrammen mit Anforderungen an nachhaltiges Wirtschaften. So unterstützen die KfW und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) den deutschen Mittelstand bei der Transformation hin zu mehr Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz mit dem Förderprogramm „Klimaschutzoffensive für den Mittelstand".

Das Programm bietet mittelständischen privaten und kommunalen Unternehmen zinsgünstige Kredite in Verbindung mit Zuschüssen für Investitionen in die Herstellung und Nutzung klimafreundlicher Anlagen und Produkte mit hoher klimaschützender Wirkung. Für die Förderung ist mit entscheidend, dass sich die zu finanzierenden Maßnahmen an die EU-weite Definition für ökonomisch nachhaltiges Wirtschaften (EU-Taxonomie[32]) anlehnen.

Im Bereich Informations- und Kommunikationstechnologien gibt es zwei Fördermaßnahmen:

- Datenverarbeitung, Hosting und damit verbundene Aktivitäten:
  Hier sind Maßnahmen förderfähig, die den Europäischen Verhaltenskodex für die Energieeffizienz von Rechenzentren umsetzen.
- Datengesteuerte Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen:
  Hier sind investive Maßnahmen zur Entwicklung und Nutzung von IKT-Lösungen förderfähig, die die Erhebung, Übermittlung, Speicherung von Daten mit dem Ziel einer Verringerung von Treibhausgasemissionen ermöglichen.

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung von Angaben der KfW[33]

5.3 Algorithmenregulierung: „Umweltziele in die Algorithmen"?

In Deutschland wird seit der Veröffentlichung des Gutachtens der Datenethikkommission im Jahr 2019 verstärkt über die Umsetzung einer Algorithmenregulierung diskutiert. In Abgrenzung zu einer Kontext-Regulierung und der Normierung von Zielen und Standards für bestimmte Anwendungen und Systeme bezieht sich eine Algorithmenregulierung unmittelbar auf die Funktionsweise algorithmischer Entscheidungssysteme. Sie „richtet den Blick auf die Architektur und Dynamik des datenverarbeitenden algorithmischen Systems und seine Auswirkungen auf Einzelne und die

[32] Die Ende 2022 in Kraft tretende EU-Taxonomie-Verordnung definiert die künftigen Standards für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten. Mit ihr führt die EU die weltweit erste „grüne Liste" für nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten ein. Es handelt sich um ein neues gemeinsames Klassifizierungssystem mit einheitlichen Begrifflichkeiten, das Anleger überall verwenden können, wenn sie in Projekte und Wirtschaftstätigkeiten mit erheblichen positiven Klima- und Umweltauswirkungen investieren wollen (https://www.bafin.de/SharedDocs/Veroeffentlichungen/DE/Fachartikel/2020/fa_bj_2008_Taxonomie-VO.html, zuletzt geprüft 21.12.2020

[33] https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen-Details_573120.html, zuletzt geprüft 21.12.2020

Gesellschaft“ (Datenethikkommission der Bundesregierung 2019). In Anbetracht der Rolle und Bedeutung von Algorithmen ist der Fokus einer Algorithmenregulierung zweifellos plausibel. Dies gilt grundsätzlich auch vor dem Hintergrund klimapolitischer Ziele: Viele gerade der ökologischen Auswirkungen digitaler Technologien gehen auf Anwendungen zurück, die Menschen Entscheidungen vorschlagen, prägen oder solche Entscheidungen automatisch übernehmen. Solche automatischen, oder algorithmischen Entscheidungssysteme, kommen täglich massenhaft in Anwendungen zur Wegfindung, bei Konsumentscheidungen, beim Verwaltungshandeln, in der Landwirtschaft oder beim Einsatz von Ressourcen oder Energie in Produktionsprozessen zur Verwendung. Algorithmen sind die Regeln, die dazu führen, dass bestimmte Steuerungsziele oder Präferenzen im Ergebnis dieser Entscheidungen in besonders effizienter und wirksamer Weise umgesetzt werden. In Anbetracht der hohen Zahl an Entscheidungen, die täglich in den unterschiedlichsten Kontexten getroffen werden, dürfte die Frage, ob diese Steuerungsziele oder Präferenzen Klimaschutzaspekte berücksichtigen, eine kaum zu überschätzende Bedeutung haben, insbesondere mit Blick auf Umwelteffekte zweiter und vor allem dritter Ordnung (vgl. zur Definition Abschnitt 1.3). Es ist daher keineswegs fernliegend, wenn vorgeschlagen wird, Ziele des Umwelt- und Klimaschutzes in den Grundbausteinen der Künstlichen Intelligenz zu verankern (Gebauer 2019).

Vorschläge einer Algorithmenregulierung sehen vor dem Hintergrund der großen und nach aller Wahrscheinlichkeit weiter anwachsenden Bedeutung algorithmischer Entscheidungssysteme eine risikoadaptierte Regulierung vor: Eine vorsorgliche Analyse und Bewertung der Algorithmen nach ihrer Kritikalität soll sicherstellen, dass Risiken minimiert und Schäden verhindert werden. In Abhängigkeit von der Systemkritikalität algorithmischer Systeme werden unterschiedliche Kritikalitätsstufen differenziert, die unterschiedliche Steuerungsinstrumente oder Vorgaben zulassen. Solche Vorgaben und Instrumente können Pflichten zur Korrektur und Kontrolle von Algorithmen regeln, Transparenzvorgaben normieren, die Erklärbarkeit und die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse vorschreiben, sowie die Zuordnung von Verantwortlichkeit und Haftung für den Einsatz von Algorithmen normieren. Die Systemkritikalität setzt dabei am Schädigungspotenzial des algorithmischen Systems an. Dabei bedeutet Schädigungspotenzial die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts und der Schwere des zu befürchtenden Schadens. Daneben ist zu berücksichtigen, wie stark Betroffene von den Entscheidungen eines Systems abhängig sind. Im Fall von nicht vertretbaren Risiken sollen auch Verbote von Anwendungen in Betracht kommen (Datenethikkommission 2019, Zweig 2019).

Ungeklärt ist, in welchem Umfang eine risikoadaptierte Regulierung von Algorithmen für die umweltpolitische Steuerung der Digitalisierung relevant sein kann. Die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bzw. die Vermeidung von Nachhaltigkeitsrisiken werden zwar in entsprechenden Ansätzen als Zielsetzungen einer Algorithmenregulierung genannt. Ein risikoadaptierter Fokus auf die intendierten oder nicht intendierten Effekte algorithmischer Systeme ist, wie dargelegt, auch aus klimaschutzpolitischer Sicht grundsätzlich sinnvoll. Entsprechende Regulierungsmechanismen sind denkbar, um Anwendungen zu identifizieren, die ökologisch besonders nachteilige Effekte hervorbringen oder verstärken. Sie könnten damit auch eine Grundlage für die Schaffung und Durchsetzung von ordnungsrechtlichen Vorgaben für Algorithmen bilden, die klimafreundlichere Handlungsalternativen vorschlagen oder implementieren. Allerdings beziehen sich die prominent genannten Anwendungsfälle auf Risiken für subjektive Rechte und klar umrissene menschliche Interessen – als Gegenstand einer ex ante Prüfung wird ganz vorrangig die Vermeidung eines diskriminierenden „data-bias“ durch algorithmische Entscheidungen, beispielsweise in der Arbeitswelt, in polizeilichen Ermittlungsverfahren, Gerichtsentscheidungen

oder durch Versicherungen genannt. Die geschützten Rechtspositionen sind in solchen Fällen regelmäßig relativ klar definiert, Rechtsverletzungen und ihr Zustandekommen sind verhältnismäßig eindeutig festzustellen. Die Effekte digitaler Anwendungen für den Klimaschutz betreffen dagegen häufig Risiken, die stark vermittelt sind, also erst durch ein Zusammenwirken unterschiedlicher Ursachen entstehen. Die Zuschreibung etwa von Verantwortung und Haftung für aggregierte und ggf. erst nach längerer Zeit sich realisierende Schadensverläufe kann im Einzelfall schwierig sein. Bei vielen Anwendungen dürfte sich die Einschätzung des in dieser Weise diffus wirkenden Schadenspotenzials konkreter Anwendungen zudem schwierig gestalten. Eine an Klimarisiken ausgerichtete Algorithmenregulierung hätte ihre – schon aus technologiespezifischen Gründen aufwändigen –[34] Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen daher um eine Analyse der nicht weniger komplexen Effekte vieler Entscheidungen, die auf der Grundlage von Algorithmen getroffen werden, zu ergänzen. Aus umweltpolitischer Sicht besteht jedenfalls noch Forschungsbedarf dahingehend, in welcher Weise und in welchem Umfang eine vorsorgliche, risikobasierte Algorithmenregulierung dazu beitragen kann, neben klar definierten und berechenbaren Klimarisiken auch die komplexen, aggregierten und systemischen Risiken für das Klima zu mindern, die gerade algorithmische Entscheidungssysteme verursachen können.

Ferner stellt sich gerade auch vor dem Hintergrund der aktuellen Diskurse um angemessene Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie die Frage, inwieweit eine starke Regulierung von Risiken politisch durchsetzbar ist – gerade wo Gefahren und Schadensverläufe komplexer sind und einen prognostischen Charakter haben, ist daher die politische Akzeptanz entsprechender Instrumente zu klären. Die Frage, welche Klimarisiken als mögliche Folgen alltäglicher Verhaltensweisen und individueller Wünsche in Kauf zu nehmen sind, betrifft nicht nur Prognosen, sondern Wertentscheidungen, über die schon im politischen Diskurs keine Einigkeit besteht. Eine verbindliche Berücksichtigung von Klimarisiken etwa bei Empfehlungsalgorithmen, beispielsweise bei der privaten Heizungssteuerung, in Navigationssystemen oder auch im Online-Handel könnte von Teilen der Wirtschaft und Gesellschaft als paternalistisch abgelehnt werden. Entsprechende Diskussionen, etwa um die Zulässigkeit eines an Nachhaltigkeitsgesichtspunkten orientierten „Nudging“ sind aktuell, soweit ersichtlich, noch auf den akademischen Bereich begrenzt (vgl. etwa Ekardt und Wieding 2016).

5.4 Umweltpolitische Weichenstellungen durch Regulierung und Governance von Daten?

Regulierung und Governance von Daten sind in vieler Hinsicht von grundlegender Bedeutung für die klimapolitische Steuerung der Digitalisierung. Diese Schlüsselrolle der Regulierung und Governance von Daten auch für die Klimaschutzpolitik wird in verschiedenen Zusammenhängen deutlich.

Zunächst bildet die möglichst optimale Versorgung mit Daten eine essenzielle Grundlage für nachhaltige digitale Innovationen: Daten sind das maßgebliche „Produktionsmittel“ digitaler Produkte und Grundlage zentraler Geschäftsmodelle, sie bilden die ökonomische und technologische Basis für Technologien wie digitale Plattformen, Big-Data Analysen und maschinelles Lernen. Diese Bedeutung hat eine inhaltliche Dimension: Um funktionierende Systeme zu entwickeln, werden nicht nur hinreichend umfangreiche, sondern auch die richtigen Daten benötigt. Ungenügende oder falsche Daten können gerade im Kontext von algorithmischen Entscheidungssystemen zu einem

[34] Zweig (2019) betont, dass Kontrolle und Überwachung eines Algorithmus nicht allein am Algorithmus des maschinellen Lernens, dem eigentlichen Entscheidungsalgorithmus oder dem ADM-System an sich ansetzen sollten. Im Fokus muss das sozio-informatische Gesamtsystem stehen, bestehend aus dem ADM-System und allen sozialen Akteuren, die es nutzen oder von dessen Entscheidungen betroffen sind.

„data bias“ und potenziell folgenreichen Fehlentscheidungen führen. Aus umweltpolitischer Sicht ist es daher zum einen erforderlich, für – etwa kommunale oder zivilgesellschaftliche – Akteure, die klimaschutzrelevante Anwendungen entwickeln können und wollen, einen quantitativ wie qualitativ hinreichenden Datenzugang zu gewährleisten. Zum anderen sollte eine nachhaltigkeitspolitisch informierte Datengovernance sicherstellen, dass klimaschutzrelevante Anwendungen, die qualitativ ungenügende Datenbestände verarbeiten und dadurch Risiken für das Klima verstärken könnten, nicht zur Anwendung kommen. Der Zugang zu umfangreichen und insbesondere qualitativ hochwertigen Datenbeständen ist auch eine notwendige Bedingung für wissenschaftliche Forschung zu Umfang und Lösungsansätzen für klimapolitische Problemstellungen. Klimapolitisch sinnvolle Anwendungen in der Verkehrssteuerung, der Energieversorgung oder in der Gebäudetechnik sind auch im Betrieb auf Echtzeit- und gegebenenfalls auch auf Feed-Back Daten angewiesen. Gesetze zu entsprechenden Anwendungen enthalten daher spezifische Regelungen zu Zugangs- und Nutzungsrechten (ebenso wie, insbesondere datenschutzrechtlichen, Pflichten bei der Datenverwendung), so etwa das „Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen“ (Messstellenbetriebsgesetz–MsbG).

Zum anderen ist eine ausreichende Datengrundlage auch eine unverzichtbare Voraussetzung, um politische und ökonomische Entscheidungen am Klimaschutz zu orientieren. Politische Steuerung bedarf gerade im Hinblick auf komplexe, systemische Probleme wie den Klimawandel einer soliden informationellen Grundlage, um sich zielgerichtet auszurichten, Umwelteffekte zu messen oder Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Einem jüngeren Bericht des UN Umweltprogramms zufolge können 68 Prozent der 93 Indikatoren für die nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs), die die Umweltdimensionen der nachhaltigen Entwicklung im Rahmen der Agenda 2030 abdecken, aufgrund fehlender Daten nicht gemessen werden. Große Datensätze und datenverarbeitende Technologien können demgegenüber nahezu in Echtzeit Einblicke in die Umwelt liefern und entsprechendes Handeln orientieren (United Nations Environment Programme 2019, Jensen und Campbell 2019). Ein hinreichender Zugang öffentlicher Akteure zu relevanten Daten ist vor diesem Hintergrund eine notwendige Bedingung für eine evidenzbasierte und effektive Klimaschutzpolitik. Mit gutem Grund wird daher hervorgehoben, dass eine zuverlässige, breite und von unterschiedlichen Akteuren der Umweltpolitik gemeinsam nutzbare digitale Datenbasis zur Stärkung der Maßnahmenplanung und -umsetzung geschaffen werden sollte (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2019b). Angesichts dieser Potenziale schlägt der WBGU etwa eine „Internationale Informations-Union“ vor, die die Weltgemeinschaft mit SDG-relevanten Daten bezogen auf verschiedene Regionen, auf unterschiedlichen Aggregationsstufen und über mehrere Jahre hinweg versorgt. Diese Open-Data-Politik soll sich demnach insbesondere auf umwelt- und sozialpolitische Themen und Governance-relevante Daten beziehen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2019a).

Die grundlegende Bedeutung eines hinreichenden Datenzugangs zur Verbesserung von Umweltrecht und umweltpolitischer Governance zeigt sich schließlich auch konkret mit Blick auf die oben dargestellten Regulierungsinstrumente: Um eine weitere Beschleunigung der Reaktionszeit des Gesetzgebers bei der Schaffung neuer Eco-Design-Regelungen zu ermöglichen, wird beispielsweise vorgeschlagen, verstärkt in die Big-Data Analyse neuer Produkte und Technologien zu investieren (Hedberg/Sipka, 2020). Neue Standards und Ziele zum Energieverbrauch digitaler Produkte sind auf einen hinreichenden Datenbestand über diese Technologien und ihre Nutzung angewiesen, um solche Analysen zu ermöglichen. Ein Zugang der zuständigen Institutionen zu den entsprechenden Daten von Herstellern und Veräußerern dieser Produkte und Anwendungen und eine auf den in diesen enthaltenen Informationen basierende Technikfolgenabschätzung kann

dementsprechend als eine Vorbedingung einer effektiven Regulierung verstanden werden. Das Umweltbundesamt will mit Blick auf nachhaltige Software in diesem Sinne beispielsweise erreichen, dass diese die Energieverbräuche für die beanspruchten lokalen und entfernten Hardwarekapazitäten und resultierenden Energieverbräuche selbstständig anzeigt und offenlegt.[35] Mit einer vergleichbaren Stoßrichtung fordert auch die Datenethikkommission die Einführung einer Pflicht zur Offenlegung der gesamten Energiebilanz eines energieintensiven Blockchain-Systems (Datenethikkommission 2019, 48). Schließlich wird auch die Möglichkeit zur Regulierung von Algorithmen durch den Zugriff auf den verarbeiteten Datenbestand bedingt. Der Code allein reicht nicht aus, um die Wirkweise eines algorithmischen Entscheidungssystems nachzuvollziehen (Zweig 2019). Für die Kontrolle komplexer und dynamischer Entscheidungssysteme ist vielmehr auch die Analyse der verarbeiteten Daten erforderlich. Auch Regulierungsvorschläge, die sich auf eine Algorithmenkontrolle fokussieren, setzen daher etwa entsprechende Zugangsrechte bzw. Transparenzverpflichtungen bezüglich der verarbeiteten Daten voraus.

Der umweltpolitischen Bedeutung des *Datenzugangs* entsprechend betonen auch die Europäische Datenstrategie[36] und der soeben vorgestellte Entwurf einer Datengovernance-Verordnung[37] durch die EU-Kommission die Bedeutung der Schaffung von Strukturen und Rechten, die einen besseren Austausch und Zugang zu Daten sicherstellen. Dabei werden bislang Schwerpunkte auf die Verbesserung der Bedingungen für den (freiwilligen) Austausch von Daten zwischen Unternehmen („data sharing“) sowie für individuelle „Datenspenden“, und auf den möglichst weitgehenden Zugang zu *öffentlichen* Datenbeständen („open data“) gelegt. In der Europäischen Datenstrategie wird die Einrichtung gemeinsamer europäischer Datenräume in Bereichen wie Gesundheit, Mobilität, Fertigung, Finanzdienstleistungen, Energie und Landwirtschaft und insbesondere zum europäischen Green Deal und in der öffentlichen Verwaltung vorgeschlagen, in denen Daten unabhängig vom physischen Ort ihrer Speicherung in der Union verwendet werden können. Schließlich soll auch im Zuständigkeitsbereich des Bundesumweltministeriums ein Umwelt- und Naturschutzinformationssystem Deutschland (UNIS-D) als Umweltdatencloud den Einsatz von KI-Systemen vereinfachen und die Teilhabe Dritter (Citizen Science) ermöglichen, um die Datengrundlagen zu verbessern (BMU 2020).

Die Bedeutung einer quantitativ wie insbesondere qualitativ hinreichenden Datenbasis für nachhaltige Systeme verweist auf die Relevanz weiterer datenspezifischer Steuerungsinstrumente aus klimapolitischer Sicht: Zum einen werden relevante Daten häufig durch das (Verkehrs- oder Konsum-)Verhalten Privater erzeugt. Digitale Technologien – etwa zur smarten Heizungssteuerung oder Stromnutzung – die auf solche Daten zugreifen müssen, sind daher auch davon abhängig, dass Privatpersonen bereit sind, ihre Daten hierfür zur Verfügung zu stellen. Damit werden Aspekte eines hinreichenden Schutzes persönlicher Daten, der Datensicherheit und der Akzeptanz der Erhebung und -verwendung – sowohl personenbezogener wie auch anonymisierter und pseudonymisierter Daten als Aspekte einer klimapolitischen Regulierung der Digitalisierung bedeutsam. In Anbetracht der Relevanz von Akzeptanzgesichtspunkten für digitale Anwendungen zielt auch der Entwurf der Datengovernance-Verordnung darauf ab, die gemeinsame Datennutzung zu erleichtern, u.a. durch die Stärkung des Vertrauens in Mittler für eine gemeinsame Datennutzung, die in verschiedenen Datenräumen eingesetzt werden sollen. Insbesondere wird die Möglichkeit der Schaffung in der Union anerkannter eingetragener „datenaltruistischer Organisationen“ vorgeschlagen, um ein

[35] S. dazu https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-12_texte_105-2018_ressourceneffiziente-software_0.pdf; Anhang 1 Kriterienkatalog für nachhaltige Software
[36] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1593073685620&uri=CELEX%3A52020DC0066.
[37] S. den Vorschlag der Kommission für eine Verordnung über eine europäische Datengovernance vom 25.11.2020, COM(2020) 767 final.

höheres Maß an Vertrauen in die Datenbereitstellung zu gewährleisten und so dazu beizutragen, dass mehr Daten von betroffenen Personen und Unternehmen zur Verfügung gestellt werden und ein höheres Entwicklungs- und Forschungsniveau erreicht wird.[38] Organisationen oder Institutionen, die sicherstellen, dass Daten etwa im Sinne geklärter Nachhaltigkeitsziele eingesetzt werden, könnten aus umweltpolitischer Perspektive eine wichtige Rolle spielen (Gailhofer und Scherf 2019).

Die Bedeutung einer ausreichenden Datenversorgung zeigt zudem auch die Relevanz rechtspolitischer Debatten um den Umgang mit „Datenmonopolen“: Ein erheblicher Teil besonders relevanter Datenbestände wird weiterhin durch globale Unternehmen wie google, amazon oder facebook gehalten, die diese für ihre Zwecke nutzen. Datenökonomische Dynamiken sorgen dafür, dass der Vorsprung dieser Unternehmen sowohl bezüglich ihres Datenbestands als auch die technologischen und ökonomischen Mittel diesen zu erweitern, weiterwächst. In Anbetracht von datenökonomischen Feedback- und Netzwerkeffekten haben alternative Anwendungen es demgegenüber häufig schwer, sich durchzusetzen. Die Chancen umweltpolitischer Akteure datengetriebene Anwendungen zu entwickeln und erfolgreich zu betreiben, könnten demgegenüber verbessert werden, wenn diesen entweder ein privilegierter Zugang zu wichtigen Datenquellen ermöglicht wird, oder Rechte – beispielsweise von Akteuren der Daseinsvorsorge – auf Zugang zu privat gehaltenen Datenbeständen geschaffen werden. Solche Rechte auf Zugang und Nutzung von Daten sollen durch die Daten-Governance Verordnung zwar zunächst nicht geschaffen werden. Neben Regelungen, die Zugang und den „freien Datenverkehr“ zwischen Unternehmen verbessern sollen, wird aber die Möglichkeit der Schaffung eines EU-Rechtsrahmens erwogen, der regelt, wie in privatem Besitz befindliche Daten vom öffentlichen Sektor im öffentlichen Interesse genutzt werden dürfen. So sollen Defizite im öffentlichen Sektor beseitigt und die evidenzbasierte Politikgestaltung oder öffentliche Dienstleistungen wie das Mobilitätsmanagement verbessert werden (s. etwa Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2019b). Um die Potenziale von privat gehaltenen Daten für den öffentlichen Sektor zu erschließen, hat die EU-Kommission bislang lediglich eine Anleitung zur gemeinsamen Nutzung von Daten des privaten Sektors vorgeschlagen.[39] In ihrer Mitteilung zu einer europäischen Datenstrategie[40] kündigt sie zudem einen europäischen Rechtsakt im Jahr 2021 an, der eine Bewertung des Rahmens für Rechte des geistigen Eigentums im Hinblick auf eine weitere Verbesserung des Datenzugangs und der Datennutzung enthalten kann. Auch das BMU setzt sich dafür ein, über den geltenden Standard des Umweltinformationsrechts hinaus und unter Berücksichtigung verfassungsrechtlicher Vorgaben, Daten privater Akteurinnen und Akteure durch neue gesetzliche Regelungen zugänglich zu machen, wenn ihre Nutzung im öffentlichen Interesse ist (BMU 2020).

Box 4: Digitale Innovationen als Herausforderung für vorausschauende Regulierung

Digitale Technologien und Geschäftsmodelle zeichnen sich durch stetigen Wandel und dynamische technologische, wie auch soziale Innovationen, aus. Durch ihre leichte und oftmals sehr schnelle Skalierung haben digitale Innovationen teils erhebliche ökonomische, gesellschaftliche, aber auch ökologische Wirkungen, die aufgrund ihrer Neuartigkeit jedoch häufig schwer zu erfassen und abzuschätzen sind.

Das Antizipieren möglicher, komplexer Folgen und damit verbunden die proaktive nachhaltigkeits- und gemeinwohlorientierte Gestaltung digitaler Entwicklungen durch den Gesetzgeber kann mit der

[38] S. den Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über europäische Daten-Governance (Daten-Governance-Gesetz), COM(2020) 767 final, S. 6.
[39] https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2018/EN/COM-2018-232-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF .
[40] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1593073685620&uri=CELEX%3A52020DC0066.

Geschwindigkeit, mit der neue digitale Technologien und Geschäftsmodelle am Markt platziert werden, aktuell nicht Schritt halten. Hinzu kommt, dass der digitale Wandel spezifische Regulierungsfragen aufwirft, die zunächst grundlegend adressiert werden müssen. Ein Beispiel dafür ist die Regulierung von Daten: Bestehende rechtliche Grundlagen geben bisher nur ungenügende Antworten darauf, wie Daten als Wirtschaftsgut zu verstehen und zu handhaben sind, das heißt unter anderem, wer sie zu welchem Zweck und unter welchen Bedingungen nutzen darf. Ein weiterer Bereich ist die Frage der Verantwortung von Entscheidungen, die mit Hilfe von algorithmischen Systemen – also beispielsweise im Bereich des automatisierten Fahrens – getroffen werden. Auch hier gilt es, die bestehenden Rechtsgrundlagen weiterzuentwickeln und rechtliche Lücken zu schließen. Oftmals stellt sich zudem die Frage, ob bestehende Instrumente auch für eine Regulierung der Digitalisierung genutzt werden können. Im Falle der europäischen Ökodesign-Richtlinie ist beispielsweise bislang unklar, ob diese auch auf Software ausgedehnt werden kann.

Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen wurden verschiedene Ansätze entwickelt, wie Regulierung dennoch proaktiv die Digitalisierung gestalten kann. Eine Überlegung ist beispielsweise, konkrete Prinzipien für die Ausgestaltung und Architektur digitaler Systeme, etwa der Entwicklung künstlicher Intelligenz, festzulegen. Eine weiterer, vom Öko-Institut vorgeschlagener Ansatz ist die „Anmeldepflicht“ neuer digitaler Geschäftsmodelle, damit diese, bevor sie auf den Markt kommen, hinsichtlich bestimmter Kriterien, etwa der Nutzung von Daten, betrachtet werden können. Damit könnten mögliche Regulierungsbedarfe frühzeitiger identifiziert werden.

Trotz vielfältiger Initiativen auf nationaler und europäischer Ebene, die digitale Entwicklung zu regulieren und damit zu gestalten, bleibt das Kernproblem, dass sich technologische Entwicklungen schneller vollziehen als Strukturen und Prozesse der Regulierung diese adressieren können, bestehen. Damit kommt den Unternehmen, die digitale Technologien und Geschäftsmodelle einsetzen und entwickeln, eine besondere Verantwortung für deren nachhaltigkeits- und gemeinwohlorientierte Gestaltung und Verwendung zu. Gerade mit Blick auf die drängenden Nachhaltigkeitsherausforderungen, wie etwa den globalen Klimawandel oder auch den Verlust der Biodiversität, engagieren sich viele Unternehmen bereits dafür, ihren ökologischen Fußabdruck zu reduzieren, beispielsweise indem sie ihren Stromverbrauch reduzieren oder auf erneuerbare Energien umstellen. Mit Blick auf die systemischen und umfassenden Wirkungen der Digitalisierung wird es hier jedoch neue Ansätze unternehmerischer Verantwortung brauchen, die zum Beispiel grundsätzliche Logiken von digitalen Geschäftsmodellen dahingehend ausrichtet, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Solche weitergehenden Vorschläge zur Governance können jedoch im Rahmen dieser Studie nicht näher ausgeführt und konkretisiert werden; dies ist weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Quelle: Eigene Darstellung

5.5 Zwischenfazit

Die Digitalisierung betrifft praktisch alle Lebens- und Gesellschaftsbereiche, der gesellschaftliche Übergang zur Klimaneutralität erfordert eine nicht weniger umfassende Anpassung der rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen. Eine klimaschutzspezifische Digitalpolitik kann und sollte ein entsprechend breites Spektrum regulatorischer Handlungsmöglichkeiten ausschöpfen. Die vorstehenden Überlegungen zeigen, dass die Umweltpolitik dies erkannt hat und auf diverse Instrumente setzt: So werden sowohl Instrumente einer indirekten (Anreiz-)Steuerung, wie die Förderung vielversprechender Technologien oder eine „grüne“ Beschaffung, als auch direkte, ordnungsrechtliche Instrumente der Verhaltenssteuerung, wie Ecodesign-Standards für Endgeräte

und digitale Infrastrukturen entwickelt und umgesetzt. Die Politik zählt aber auch auf öffentlich finanzierte Forschung und übergeordnete Strategien, wie die Schaffung spezifischer Datenräume und Datenstrategien, um umweltpolitischen Akteuren die technologischen, ökonomischen und informatorischen Mittel zur Entwicklung innovativer Lösungen an die Hand zu geben.

Eine Priorisierung der Instrumente erscheint in Anbetracht der vielschichtigen und vielfältigen Problemstellungen problematisch. Ein pragmatischer Blick auf die schon heute fassbaren Chancen und Risiken – und entsprechend operationalisierbare, ordnungsrechtliche oder förderrechtliche Instrumente – erscheint plausibel. Dementsprechend ist es sinnvoll, wenn nunmehr bekannte Probleme mit weitreichender Bedeutung, wie etwa der Energieverbrauch digitaler Infrastrukturen oder Rechenzentren, mit bewährten Instrumenten, wie beispielsweise der Ökodesign-Richtlinie, adressiert und dynamisch entsprechende Standards entwickelt werden. Komplexität und Dynamik der Situation sollten aber insbesondere auch zum Anlass genommen werden, Wissenschaft und Forschung zu Problemen und Lösungsansätzen zu fördern. Eine ähnlich grundsätzliche Strategie kann mit Blick auf datenregulatorische Weichenstellungen verfolgt werden: So hat der Vorschlag auf EU-Ebene, es Bürgern und Unternehmen zu ermöglichen oder zu erleichtern, über datenaltruistische Organisationen, wertvolle Daten für Gemeinwohlzwecke zu spenden, ein erhebliches Potenzial, nachhaltige Innovationen zu fördern, die zum heutigen Zeitpunkt womöglich noch nicht absehbar sind.

6 Literaturverzeichnis

7 Literaturverzeichnis

ACEA (2017): Platooning Roadmap. What ist Truck Platooning. Hg. v. European Automobile Manufactures Association.

Acton, M.; Bertoldi, P.; Booth, J. (2020): 2020 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency. JRC Technical Report. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc119571_jrc119571_2020_best_practice_guidelines_v11.1.0a_br_ma_21_jan.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J. (2021): 2021 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency. Hg. v. European Commission. Ispra (JRC123653).

Aengenvoort, Jan (2020): Redispatch 2.0 - Was bedeutet das für die Erneuerbaren? In: *Next Kraftwerke GmbH*, 20.08.2020. Online verfügbar unter https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/redispatch-2-0-erneuerbare-energien, zuletzt geprüft am 22.03.2021.

Allekotte, Michel; Biemann, Kirsten; Heidt, Christoph; Colson, Marie; Knörr, Wolfram (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). Berichtsteil TREMOD. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu-Institut (Texte 116/2020, Projektnummer 123 135).

Arndt, Wulf-Holger; Bauknecht, Dierk; Bergmann, Thomas; Gröger, Jens; Libbe, Jens; Mottschall, Moritz et al. (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. Hg. v. Umweltbundesamt. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu); Öko-Institut Freiburg. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-15_texte_64_2017_infrastrukturen.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2020.

Ausfelder, F.; Roon, S. von; Seitz, A. (Hg.) (2019): Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II. Analysen| Technologien | Beispiele. Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Kopernikus_Flexoptionen_Band+II_kompl.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Bauknecht et al. (2017): Bestandsaufnahme und orientierende Bewertung dezentraler Energiemanagementsysteme. Climate Change 16/2017. Hg. v. Umweltbundesamt.

Beckmann, M. (2020): Energiesprong. Betrachtung des ganzheitlichen Konzepts fürserielles Sanieren unter den Rahmenbedingungen von Mehrfamilienhäusern. Zweites Masterprojekt. Technische Hochschule Köln, Köln. Online verfügbar unter https://epb.bibl.th-koeln.de/frontdoor/deliver/index/docId/1551/file/Beckmann_Energiesprong_200527.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Bertschek, Irene; Ebert, Martin; Ohnemus, Jörg; Weber, Tobias (2018): Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2018. Hg. v. BMWi. ZEW Mannheim; Kantar TNS. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/monitoring-report-wirtschaft-digital-2018-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 08.10.2020.

BET (2021): Redispatch 2.0. Eine Frage der Koordination. Hg. v. BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Online verfügbar unter https://www.bet-energie.de/themen/netzinfrastruktur-technik/redispatch-20, zuletzt aktualisiert am 22.03.2021, zuletzt geprüft am 22.03.2021.

Bieser, Jan; Hintemann, Ralph; Beucker, Severin; Schramm, Stefanie; Hilty, Lorenz (2020): Klimaschutz durch digitale Technologien. Hg. v. Bitkom e.V. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2020.

Bitkom e.V (Hg.) (2020): Das intelligente Zuhause: Smart Home 2020. Ein Bitkom-Studienbericht. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-09/200922_studienbericht_smart-home.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

BMU (2019): Klimaschutz in Zahlen 2019. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimaschutzpolitik. Ausgabe 2019. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf, zuletzt geprüft am Dezember 2020.

BMU (Hg.) (2020): Umweltpolitische Digitalagenda. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/broschuere_digitalagenda_bf.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2020.

BMVI (2018): Energie auf neuen Wegen. Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Hg. v. BMVI.

BMVI (Hg.) (2019): Bericht zum Breitbandatlas Teil 1: Ergebnisse. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-ende-2019-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

BMWi (2017): Rolle der Digitalisierung im Gebäudebereich. Eine Analyse von Potenzialen, Hemmnissen, Akteuren und Handlungsoptionen. Unter Mitarbeit von C. Müller. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/rolle-der-digitalisierung-im-gebaeudebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

BMWi (Hg.) (2020a): IKT-Branchenbild 2020. Volkswirtschaftliche Kennzahlen, Innovations- und Gründungsgeschehen. Unter Mitarbeit von Mareike Seifried, Irene Bertschek, Thomas Niebel und Christian Rammer. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/ikt-branchenbild.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

BMWi (2020b): Kurzgutachten zu Maßnahmen zur Zielerreichung 2030 zur Begleitung des Klimakabinetts. Unter Mitarbeit von N. Thamling und A. Kemmler. Berlin, Basel, Freiburg, Heidelberg, Köln. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kurzgutachten-zu-massnahmen-zur-zielerreichung-2030-zur-begleitung-des-klimakabinetts.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

Bracker, Joß; Seebach, Dominik (2019): Strombilanzierung im Verkehrssektor. Teilbericht des Projektes „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 134/2019).

Brandt, Andrea; Jentzsch, Gregor; Pradka, Alexander (2019): EDDI. Elektronische Deichsel - Digitale Innovation. Hochschule FRESENIUS; DB Schenker; MAN Truck and Bus.

Braun, Helge (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Brown, Austin; Gonder, Jeffrey; Repac, Brittany (2014): Erratum to: An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicles. In: Gereon Meyer und Sven Beiker (Hg.): Road Vehicle Automation. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mobility), E1-E1.

Bundesnetzagentur (Hg.) (2019): Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2018/2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2019/TK_20182019.pdf?__blob=publicationFile&v=9, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

Bundesregierung (2014): Digitale Agenda 2014-2017. Hg. v. BMWi, BMI und BMVI.

Bundesregierung (2019): Digitalisierung gestalten. Umsetzungsstrategie der Bundesregierung. Hg. v. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/resource/blob/992814/1605036/61c3db982d81ec0b4698548fd19e52f1/digitalisierung-gestalten-download-bpa-data.pdf?download=1, zuletzt geprüft am 12.02.2019.

Büttner, Lisa; Breitkreuz, Anna (2020): How COVID-19 working routines can save emissions in a post-COVID-19 world. Hg. v. Greenpeace. Berlin.

Cisco (2019): VNI Mobile Forecast Highlights Tool. Online verfügbar unter https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/forecast-highlights-mobile.html, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Cisco public (2020): Cisco Annual Internet Report (2018–2023). White Paper.

Clausen, Jens; Hintemann, Ralph (2018): Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb. Borderstep-Institut. Online verfügbar unter https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Danken, Thomas; Kühn, Hannes (2020): Monitor Digitale Verwaltung #4. Hg. v. Nationaler Normenkontrollrat. Online verfügbar unter https://www.normenkontrollrat.bund.de/resource/blob/72494/1783152/14635b15fe7f6902039abcd653de6c61/20200909-monitordigitaleverwaltung-4-data.pdf?download=1, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Datenethikkommission der Bundesregierung (Hg.) (2019): Gutachten der Datenethikkommission. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/it-digitalpolitik/gutachten-datenethikkommission.pdf;jsessionid=F2B6D784A1A2B0D47C30CA95400216CA.2_cid295?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Deloitte (2018): Smart Home Consumer Survey 2018. Ausgewählte Ergebnisse für den deutschen Markt. Online verfügbar unter

https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/Deloitte_TMT_Smart_Home_Studie_18.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

Deloitte Deutschland (2020): Smartphone-Konsum am Limit? Studie zur Smartphone-Nutzung: Der deutsche Mobile Consumer im Profil. Online verfügbar unter https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/smartphone-nutzung-2020.html, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2010): dena-Netzstudie II. Publikationen der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena). Stand: März 2010, dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9106_Studie_dena-Netzstudie_II_deutsch.PDF.

Dürr, T.; Heyne, J.-C. (Hg.) (2017): Realisierung Utility 4.0 Band 1. Unter Mitarbeit von Oliver D. Doleski. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Ecofys und Fraunhofer IWES (2017): Smart Market Design in deutschen Verteilnetzen. Entwicklung und Bewertung von Smart Markets und Ableitung einer Regulatory Roadmap. Hg. v. Studie im Auftrag der Agora Energiewende. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Smart_Markets/Agora_Smart-Market-Design_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 10.12.2020.

Ekardt, Felix; Wieding, Jutta (2016): Nudging and Environmental Law. In: Klaus Mathis und Avishalom Tor (Hg.): Nudging. Possibilities, Limitations and Applications in European Law and Economics, S. 247–262.

Enquete-Kommission (2013): „Internet und digitale Gesellschaft“. Achter Zwischenberichtder Enquete-Kommission „Internet und digitale Gesellschaft“. Wirtschaft, Arbeit, Green IT. Hg. v. Deutscher Bundestag. Berlin. Online verfügbar unter https://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/125/1712505.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2020.

Enzian, Felix; Brzoska, Ina (2019): Warum Platooning die Zukunft des Lieferverkehrs ist. MAN Truck and Bus. Online verfügbar unter https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/warum-platooning-die-zukunft-des-lieferverkehrs-ist.html, zuletzt aktualisiert am 03.12.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Ericsson (2020): Ericsson Mobility Report June 2020.

Europäische Kommission (Hg.) (2019): Index für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft (DESI) Länderbericht 2019 Deutschland.

Europäische Kommission (Hg.) (2020a): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 14.12.2020.

Europäische Kommission (Hg.) (2020b): Index für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft (DESI) 2020 Deutschland. Online verfügbar unter file:///C:/Users/Admin%20SB/Downloads/DESI2020-GERMANY-lang.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

European Commission (2020a): Supporting the green transition. Shaping Europe's digital future. Brussels. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_281, zuletzt geprüft am 19.02.2020.

European Commission (2020b): The Digital Economy and Society Index (DESI). DESI 2020. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/digital-economy-and-society-index-desi-2020, zuletzt aktualisiert am 19.06.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

FiS (2019): Kapazitätsengpässe der Schienenwege als Hindernis für den Kombinierten Verkehr. Forschungs- und Informationssystem. Online verfügbar unter https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/306415/, zuletzt aktualisiert am 03.12.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Fraedrich, Eva; Kröger, Lars; Bahamonde-Birke, Francisco; Frenzel, Ina; Liedtke, Gernot; Trommer, Stefan et al. (2017): Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen. Hg. v. e-mobil BW und DLR.

Gailhofer, Peter; Scherf, Cara-Sophie (2019): Regulierung der Datenökonomie. Ansätze einer ökologischen Positionierung. Öko-Institut Working Paper. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Datenregulierung.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Gebauer, Jochen (2019): Roboter als Klimaschützer. In: *Zeitschrift für Umweltrecht (ZUR)* (10), S. 513–514.

Gensch, C.; Gailhofer, P.; Gsell, M. (2019): Digitalisierung und Nachhaltigkeit: Politische Gestaltung zwischen Möglichkeiten, falschen Versprechungen und Risiken. Unter Mitarbeit von C. Heinemann, N. Kampffmeyer und J. Krohn. Öko-Institut e.V. (Working Paper, 6/2019). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Digitalisierung-Nachhaltigkeit.pdf, zuletzt geprüft am 15.10.2020.

Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. v. BDI. Online verfügbar unter https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/, zuletzt geprüft am 10.12.2020.

Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Global Carbon Project (2020): Global Carbon Atlas. Online verfügbar unter http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Goldkamp, Philip; Schallenberg, Jan (2017): Probleme lösen bevor sie entstehen: Lokale Flexibilitätsmärkte. In: T. Dürr und J.-C. Heyne (Hg.): Realisierung Utility 4.0 Band 1. Unter Mitarbeit von Oliver D. Doleski. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 627–637.

Gröger, Jens (2018 - Korrekturversion 2020): Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung von Software. Empfehlungen aus dem UFOPLAN-Projekt 3715 37 601 0 „Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik“. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 62/2019).

Gröger, Jens (2020): Digitaler CO2-Fußabdruck. Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungsaufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Digitaler-CO2-Fussabdruck.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Gröger, Jens; Köhler, Andreas; Naumann, Stefan; Filler, Andreas; Guldner, Achim; Kern, Eva et al. (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 105/2018). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-12_texte_105-2018_ressourceneffiziente-software_0.pdf.

Gröger, Jens; Köhn, Marina; Stobbe, Lutz (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/politische-handlungsempfehlungen-green-cloud-computing_2020_09_07.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Görz, Wolf; Bernecker, Tobias; Speiser, Jonas; Röckle, Felix et al. (2020): StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2021.

Hartwig, Matthias; Stegmaier, David; Ringwald, Roman; Hoff, Felix; Gut, Lisa Angela; Reck, Anja (2020): Gutachten: Truckplatooning in Deutschland und den Niederlanden. Status quo und rechtliche Grundlagen. Lessons Learned und Anpassungsbedarf für den Rechtsrahmen. Hg. v. Provincie Gelderland.

Hedberg, Annika; Šipka, Stefan (2020): Improving biodiversity: How can digitalisation help? European Policy Centre. Online verfügbar unter https://wms.flexious.be/editor/plugins/imagemanager/content/2140/PDF/2020/Digitalisation_v3.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Hilpert, J. (2019): Rechtsrahmen für netzdienliche Flexibilitätsplattformen. Rechtliche Prüfung des Konzepts "Grid Integration". Hg. v. Stiftung für Umweltenergierecht.

Hilty, Lorenz M. (2008): Information technology and sustainability. Essays on the relationship between ICT and sustainable development. Norderstedt: Books on Demand. Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3125286&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Hilty, Lorenz M.; Lohmann, Wolfgang; Behrendt, Siegfried; Evers-Wölk, Michaela; Fichter, Klaus; Hintemann, Ralph (2015): Grüne Software. Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT), TV 3: Potenzialanalyse zur Ressourcenschonung optimierter Softwareentwicklung und -einsatz. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 22/2015). Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gruene-software.

Hintemann, Ralph (2018): NeRZ-Kurzstudie-Stand-20180327. Online verfügbar unter https://ne-rz.de/wp-content/uploads/2018/04/NeRZ-Kurzstudie-Stand-20180327.pdf, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Hintemann, Ralph (2020): Edge-Rechenzentren: Hype oder nachhaltiger Trend? Online verfügbar unter https://www.datacenter-insider.de/edge-rechenzentren-hype-oder-nachhaltiger-trend-a-804026/, zuletzt aktualisiert am 10.08.2020, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon: Energy consumption of data centers worldwide How will the Internet become green? Borderstep Institute.

Hoffmann-Riem, Wolfgang (2016): Selbstregelung, Selbstregulierung und regulierte Selbstregulierung im digitalen Kontext. In: Michael Fehling und Utz Schliesky (Hg.): Neue Macht- und Verantwortungsstrukturen in der digitalen Welt: Nomos Verlagsgesellschaft, S. 27–52.

Hofmann, Josephine; Piele, Alexander; Piele, Christian (2020): Arbeiten in der Corona-Pandemie. Auf dem Weg zum New Normal. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Online verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5934454.pdf.

Hook, Andrew; Court, Victor; Sovacool, Benjamin K.; Sorrell, Steve (2020): A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking. In: *Environ. Res. Lett.* 15 (9), S. 93003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8a84.

IAE (Hg.) (2020): Data Centres and Data Transmission Networks. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Icha, Petra (2020): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 -2019. Unter Mitarbeit von Gunter Kuhs. Umweltbundsamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2020.

IEA (Hg.) (2018): World Energy Outlook 2018. Flagship report. Online verfügbar unter https://webstore.iea.org/download/direct/2375?fileName=World_Energy_Outlook_2018.pdf, zuletzt geprüft am 05.12.2020.

IEA (2020a): Working from home can save energy and reduce emissions. But how much? – Analysis - IEA. Online verfügbar unter https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much, zuletzt aktualisiert am 03.12.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

IEA (2020b): Digitalization and Energy – Analysis. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy#energy-use-by-information-and-communications-technologies, zuletzt aktualisiert am 04.09.2020, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

IEA, International Energy Agency (2017): Digitalization & Energy: OECD.

Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH (Hg.) (2016): Studie zum Energieeinsparpotential durch den Einsatz von elektronischen Thermostaten. Verbraucherzentrale NRW e.V. Kassel. Online verfügbar unter https://www.verbraucherzentrale.nrw/sites/default/files/2017-10/VZNRW_StudieElektronischeThermostate.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Initiative D21; TUM (Hg.) (2020): eGovernment MONITOR 2020. Online verfügbar unter https://initiatived21.de/app/uploads/2020/10/egovernment_monitor_2020_onlineausgabe.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2020.

Janssen, Robbert; Zwijnenberg, Han; Blankers, Iris; Kruijff, Janiek de (2015): Truck Platooning. Driving the Future of Transportation. Hg. v. TNO.

Jensen, David; Campbell, Jillian (2019): The Case for a Digital Ecosystem for the Environment. UN Environment. Online verfügbar unter http://sdg.iisd.org/commentary/guest-articles/the-case-for-a-digital-ecosystem-for-the-environment/, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Kersken, M.; Sinnesbichler, H. (2013): Simulationsstudie zum Energieeinsparpotenzial einer Heizungsregelung mit Abwesenheitserkennung und Wetterprognose. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP-Mitteilung, 527). Online verfügbar unter https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/501-550/527.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Kersken, M.; Sinnesbichler, H.; Erhorn, H. (2018): Analyse der Einsparpotenziale durch Smarthome-und intelligente Heizungsregelungen. In: *Bauphysik* 40 (5), S. 276–285. Online verfügbar unter https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/sonderdrucke/bauphysik-gertis/6-einsparpotenziale-intelligente-heizungsregelung.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Klöß, Sebastian (2020): Die Zukunft der Consumer Technology. Marktentwicklung, Trends, Mediennutzung, Technologien, Geschäftsmodelle. Hg. v. Bitkom e.V.

Köhler, Andreas (2017): Endbericht zum Projekt Green IT-Einsparpotenziale. GreenIT-ESP-2015. Unter Mitarbeit von David Geiger und Gröger, Jens, Wilkens, Marc.

Koomey, Jonathan; Berard, Stephen; Sanchez, Marla; Wong, Henry (2011): Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. In: *IEEE Annals Hist. Comput.* 33 (3), S. 46–54. DOI: 10.1109/MAHC.2010.28.

Kroher, Thomas; Rudschies, Wolfgang (2020): Autonomes Fahren: Der aktuelle Stand der Technik. ADAC. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/aktuelle-technik/, zuletzt aktualisiert am 16.11.2020, zuletzt geprüft am 16.11.2020.

Le Quéré, Corinne; Jackson, Robert B.; Jones, Matthew W.; Smith, Adam J. P.; Abernethy, Sam; Andrew, Robbie M. et al. (2020): Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement. Nature Climate Change, 10(7), 647-653. In: *Nat. Clim. Chang.* 10 (7), S. 647–653. DOI: 10.1038/S41558-020-0797-X.

Liu, Ran; Gailhofer, Peter; Gensch, Carl-Otto; Köhler, Andreas; Wolff, Franziska (2019): Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability. Issue Paper under Task 3 from the "Service contract on future EU environment policy". Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/studies/issue_paper_digital_transformation_20191220_final.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Lu, Xiao-Yun (2011): Automated Truck Platoon Control.

Lu, Xiao-Yun; Shladover, Steven E. (2014): Automated Truck Platoon Control and Field Test. In: Gereon Meyer und Sven Beiker (Hg.): Road Vehicle Automation. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mobility), S. 247–261.

MAN Gruppe (2020): European Truck Platooning. Mobilität und Energie.

Marc Schelewsky; Robert Follmer; Christian Dickmann (2020): CO2-Fußabdrücke im Alltagsverkehr: Datenauswertung auf Basis der Studie Mobilität in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt (Texte, 224/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_224-2020_co2-fussabdruecke_alltagsverkehr_0.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2021.

Markert, Lisa Allegra; Pauly, Bastian (2020): Corona-Pandemie: Arbeit im Homeoffice nimmt deutlich zu. Bitkom e.V. Online verfügbar unter

https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Corona-Pandemie-Arbeit-im-Homeoffice-nimmt-deutlich-zu, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Masanet, Eric; Shehabi, Arman; Lei, Nuoa; Smith, Sarah; Koomey, Jonathan (2020): Recalibrating global data center energy-use estimates. In: *Science (New York, N.Y.)* 367 (6481), S. 984–986. DOI: 10.1126/science.aba3758.

McHugh, Brian (2020): Gartner's IT Automation Predictions for 2020. Online verfügbar unter https://info.advsyscon.com/it-automation-blog/gartner-it-automation, zuletzt aktualisiert am 10.08.2020, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

McSweeney, R.; Tandon, A. (2020): Global Carbon Project: Coronavirus causes ‘record fall’ in fossil-fuel emissions in 2020. Hg. v. CarbonBrief. Online verfügbar unter https://www.carbonbrief.org/global-carbon-project-coronavirus-causes-record-fall-in-fossil-fuel-emissions-in-2020, zuletzt aktualisiert am 11.12.2020, zuletzt geprüft am 14.12.2020.

Müller, C. (2017): Rolle der Digitalisierung im Gebäudebereich. Eine Analyse von Potenzialen, Hemmnissen, Akteuren und Handlungsoptionen. Unter Mitarbeit von A. Barckhausen, M. Bons, J. Eder, A. Hercegfi, H. Maas, C. Nabe et al. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/rolle-der-digitalisierung-im-gebaeudebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht. Hg. v. BMVI. infas; DLR; IVT; infas 360. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter www.mobilitaet-in-deutschland.de.

Özalay, Baris; Schuster, Henning; Kellermann, Jan; Priebe, Jens; Moser, Albert (2019): Wirtschaftlicher Vorteil der netzdienlichen Nutzung von Flexibilität in Verteilnetzen. Kurzstudie im Auftrag von innogy SE, EWE NETZ GmbH, Stadtwerke München Infrastruktur GmbH. Online verfügbar unter https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2019/02/20190212_Studie-E-Bridge_Vorteil_netzdienlicher-Flexibilit%C3%A4t_final.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2021.

Pauly, Bastian; Kriegeskotto, Nick; Klöß, Sebastian (2020): Markt rund um Smartphones wächst auf 36 Milliarden Euro. Bitkom e.V. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Markt-rund-um-Smartphones-waechst-auf-36-Milliarden-Euro, zuletzt aktualisiert am 12.08.2020, zuletzt geprüft am 12.08.2020.

Plattform Industrie 4.0 (Hg.): Was ist Industrie 4.0? Menschen, Maschinen und Produkte sind direkt miteinander vernetzt: die vierte industrielle Revolution hat begonnen. Online verfügbar unter https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html, zuletzt geprüft am 22.02.2021.

Prakash, Siddharth; Antony, Florian; Köhler, Andreas; Liu, Ran (2016a): Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC). Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (TEXTE 66/2016).

Prakash, Siddharth; Dehoust, Günter; Gsell, Martin; Schleicher, Tobias; Stamminger, Rainer (2016b): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen Obsoleszenz“. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 11/2016). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf.

Prakash, Siddharth; Liu, Ran; Schischke, Karsten; Stobbe, Lutz (2011): Zeitlich optimierter Einsatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten. Hg. v. Umweltbundesamt. Freiburg.

PwC (2017): Die digitalisierte dezentrale Energieversorgung von morgen gestalten. Hg. v. PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.

Quack, D.; Liu, R.; Gröger, J. (2019): Smart Home – Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Smarthome-Stromverbrauch.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Ramezani, Hani; Shladover, Steven E.; Lu, Xiao-Yun; Altan, Osman D. (2018): Micro-Simulation of Truck Platooning with Cooperative Adaptive Cruise Control: Model Development and a Case Study. In: *Transportation Research Record* 2672 (19), S. 55–65. DOI: 10.1177/0361198118793257.

Rammer, Christian Rammer; Bertschek, Irene; Schuck, Bettina; Demary, Vera; Goecke, Henry (2020): Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Deutschen Wirtschaft. Stand der KI-Nutzung im Jahr 2019. Hg. v. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/einsatz-von-ki-deutsche-wirtschaft.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D8, zuletzt geprüft am 11.12.2020.

Raveling, Jann (2020): Was ist Industrie 4.0? Die Definition von Digitalisierung. Hg. v. WFB - Wirtschaftsförderung Bremen GmbH. Online verfügbar unter https://www.wfb-bremen.de/de/page/stories/digitalisierung-industrie40/was-ist-industrie-40-eine-kurze-erklaerung, zuletzt aktualisiert am 13.10.2020, zuletzt geprüft am 22.03.2021.

Rudolph, Frederic; Koska, Thorsten; Schneider, Clemens (2017): Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO2-freier Mobilität bis 2035. Kurzstudie. Hg. v. Greenpeace und Wuppertal Institut.

Sandvine (2018): Global Internet Phenomena Report. October 2018.

Schebek, Liselotte; Kannengießer, Jan; Campitelli, Alessio; Fischer, Julia; Abele, Eberhard; Bauerdick, Christoph et al. (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. VDI ZRE. Berlin. Online verfügbar unter https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Schellong, Wolfgang (2016): Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schemmel, Jan Peter; Schumacher, Katja (2020): Zukunftsfähige Konjunkturimpulse zur Bewältigung der wirtschaftlichen Folgen der Corona-Krise. Öko-Institut. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Zukunftsfaehige-Konjunkturimpulse.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Schermeyer, Hans (2018): Netzengpassmanagement in regenerativ geprägten Energiesystemen. Untersuchungen zur Abregelung Erneuerbarer Energien und zur Sektorenkopplung in einem deutschen Verteinetz. zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation.

Schneiders, T.; Rehm, T.; Hilger, L. (2018): Feldtest in 120 Haushalten zur Untersuchung von Heizenergieeinsparungen in Bestandsgebäuden. vise (VISE Policy Brief). Online verfügbar unter

https://www.smart-energy.nrw/sites/smartenergy/files/vise_policy_brief_q_3_2018.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

Schödwell, B.; Zarnekow, R.; Liu, R.; Gröger, J.; Wilkens, M. (2017): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2020.

Simon, Ralph; Münch, Michael; Herold, Leonie (2018a): Dezentrale Stromversorgung und zeitsynchroner Verbrauch im Land- kreis Cochem-Zell. Innovatives Klimaschutzteilkonzept. eine Studie der Transferstelle Bingen. Hg. v. Kreisverwaltung Cochem-Zell. Transferstelle Bingen (TSB); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter https://www.unser-klima-cochem-zell.de/kv_cochem_zell_bioenergie/Aktuelles/2018/News%20ab%20Mai%202017/Mit%20Innovation%20zum%20Erfolg%20%E2%80%93%20Schwarmspeicher%20und%20Virtuelles%20Kraftwerk%20sollen%20Schwung%20in%20die%20Energiewende%20im%20Landkreis%20Cochem-Zell%20bringen/Bericht%20KSI%20TK%20Innovativ%20LK%20COC%20vK.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2021.

Simon, Ralph; Münch, Michael; Herold, Leonie (2018b): Dezentrale Stromversorgung und zeitsynchroner Verbrauch im Land- kreis Cochem-Zell. Innovatives Klimaschutzteilkonzept. Bericht - Kurzfassung. Hg. v. Kreisverwaltung Cochem-Zell. Transferstelle für Rationelle und Regenerative Energienutzung; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter https://www.unser-klima-cochem-zell.de/kv_cochem_zell_bioenergie/Aktuelles/2018/News%20ab%20Mai%202017/Mit%20Innovation%20zum%20Erfolg%20%E2%80%93%20Schwarmspeicher%20und%20Virtuelles%20Kraftwerk%20sollen%20Schwung%20in%20die%20Energiewende%20im%20Landkreis%20Cochem-Zell%20bringen/131506_AW_Kurzbericht_Projekt_lastgan_12320747_34.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2021.

Springmann et al. (2020): KOF und ALF - Wie passen Flexibilitätsplattformen mit der Koordinierungsfunktion des FNN zusammen? FfE Discussion Paper, SINTEG Projekt. Hg. v. FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft.

Statista (2020a): Prognose zu den weltweiten IT-Ausgaben für Datencenter-Systeme von 2012 bis 2021. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/819519/umfrage/weltweite-it-ausgaben-fuer-datencenter-systeme/, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Statista (2020b): Einwohnerzahl von Deutschland bis 2019. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2861/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-deutschlands/, zuletzt aktualisiert am 13.10.2020, zuletzt geprüft am 13.10.2020.

Statista (2020c): Global AI software market size 2018-2025 | Statista. Online verfügbar unter https://www.statista.com/statistics/607716/worldwide-artificial-intelligence-market-revenues/, zuletzt aktualisiert am 01.10.2020, zuletzt geprüft am 01.10.2020.

Statistisches Bundesamt (2019): 90 % der Bevölkerung in Deutschland sind online. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/09/PD18_330_634.html, zuletzt aktualisiert am 10.03.2019, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Stobbe, Lutz; Beucker, Severin; Clausen, Jens; Hintemann, Ralph; Proske, Marina; Zedel, Hannes (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 06.09.2020.

Streim, Andreas (2020): Deutsche Wirtschaft läuft der Digitalisierung weiter hinterher. Bitkom e.V. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-Wirtschaft-laeuft-der-Digitalisierung-weiter-hinterher, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Tsugawa, Sadayuki; Jeschke, Sabina; Shladover, Steven E. (2016): A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings. In: *IEEE Trans. Intell. Veh.* 1 (1), S. 68–77. DOI: 10.1109/TIV.2016.2577499.

Umweltbundesamt (2020a): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkungdes Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenarien IX“)“. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/abschaetzung_treibhausgasminderungswirkung_klimaschutzprogramms2030_der_bundesregierung_final.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2021.

Umweltbundesamt (2020b): Nationale Trendtabellen für die Treibhausgasemissionen nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes. Dessau-Roßlau.

United Nations Environment Programme (Hg.) (2019): Measuring Progress. Towards achieving the environmental dimension of the SDGs. Online verfügbar unter file:///C:/Users/I359D~1.WAR/AppData/Local/Temp/MeaProg2019.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

VDA (2016): Ideen sind unser Antrieb. Nutzfahrzeuge 2016. Hg. v. Verband der Automobilindustrie.

VDA (2020): Verkehr. Straßengüterverkehr. Wirtschaftspolitik und Infrastruktur. Verband der Automobilindustrie. Online verfügbar unter https://www.vda.de/de/themen/wirtschaftspolitik-und-infrastruktur/verkehr/gueterverkehr.html, zuletzt aktualisiert am 03.12.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

VDE Mobility (2020): Die Digitalisierung bringt weitere Effizienz in den Transport- und Gütersektor - VDE. Online verfügbar unter https://www.vde.com/topics-de/mobility/aktuelles/digitalisierung-transport-und-guertersektor-interview-zohm-man, zuletzt aktualisiert am 03.12.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, S. 1–18. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

Weyer, H.; Müsgens, F. (2020): Netzengpässe als Herausforderung für das Stromversorgungssystem. Regelungsfelder, Status Quo, Handlungsoptionen. Hg. v. Acatech (Energiesysteme der Zukunft). Online verfügbar unter https://www.acatech.de/publikation/analyse-netzengpaesse-als-herausforderung-fuer-das-stromversorgungssystem/.

Winter, Sebastian (2018): 1128_Diskussionspapier_Netzbetrieb_2.0. Grundsätze des zukünftigen Netzbetriebs und der Zusammenarbeit von Übertragungs-und Verteilnetzbetreibern. Hg. v. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/20181128_Diskussionspapier_Netzbetrieb_2.0.pdf#page=1&zoom=auto,-12,843.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hg.) (2019a): Digitales Momentum für die UN-Nachhaltigkeitsagenda im 21. Jahrhundert. Politikpapier. Unter Mitarbeit von Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin (10). Online verfügbar unter https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/politikpapiere/pp10_2019/pdf/WBGU_PP10_DT.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hg.) (2019b): Ein europäischer Weg in unsere gemeinsame digitale Zukunft. Politikpapier. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (11). Online verfügbar unter https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/pp11-2019, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

Wohlschlager, D.; Ostermayer, M.; Köppl, S.; Regett, A. (2020): Ökologische Bewertung digitaler Energieinfrastruktur (FfE). 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria 2020.

Zweig, Katharina A. (2019): Algorithmische Entscheidungen: Transparenz und Kontrolle. Konrad Adenauer Stiftung (Analysen und Argumente, 338). Online verfügbar unter https://www.kas.de/documents/252038/4521287/AA338+Algorithmische+Entscheidungen.pdf/533ef913-e567-987d-54c3-1906395cdb81?version=1.0&t=1548228380797, zuletzt geprüft am 17.12.2020.

8 Anhang

Anhang I. Struktur und Indikatoren des DESI der Europäischen Union

Sub-Dimension	Indikator	Beschreibung
Dimension 1: Connectivity		
1a Fixed broadband take-up	1a1 Overall fixed broadband take-up	% of households subscribing to fixed broadband
	1a2 At least 100 Mbps fixed broadband take-up	% of households subscribing to fixed broadband of at least 100 Mbps, calculated as overall fixed broadband take-up (source: Eurostat) multiplied with the percentage of fixed broadband lines of at least 100 Mbps
1b Fixed broadband coverage	1b1 Fast broadband (NGA) coverage	% of households covered by fixed broadband of at least 30 Mbps download. The technologies considered are FTTH, FTTB, Cable Docsis 3.0 and VDSL
	1b2 Fixed Very High Capacity Network (VHCN) coverage	% of households covered by any fixed VHCN. The technologies considered are FTTH and FTTB for 2015-2018 and FTTH, FTTB and Cable Docsis 3.1 for 2019
1c Mobile broadband	1c1 4G coverage	% of populated areas with coverage by 4G - measured as the average coverage of telecom operators in each country
	1c2 Mobile broadband take-up	Number of mobile data subscriptions per 100 people
	1c3 5G readiness	The amount of spectrum assigned and ready for 5G use by the end of 2020 within the so-called 5G pioneer bands. These bands are 700 MHz (703-733 MHz and 758-788 MHz), 3.6 GHz (3400-3800 MHz) and 26 GHz (1000 MHz within 24250-27500 MHz). All three spectrum bands have an equal weight.
1d Broadband price index	1d1 Broadband price index	The broadband price index measures the prices of representative baskets of fixed, mobile and converged broadband offers.
Dimension 2: Human Capital		
2a Internet user skills	2a1 At least basic digital skills	Individuals with ‘basic’ or ‘above basic’ digital skills in each of the following four dimensions: information, communication, problem solving and software for content creation (as measured by the number of activities carried out during the previous 3 months).
	2a2 Above basic digital skills	Individuals with ‘above basic’ digital skills in each of the following four dimensions: information, communication, problem solving and software for content creation (as measured by the number of activities carried out during the previous 3 months).
	2a3 At least basic software skills	Individuals who, in addition to having used basic software features such as word

Sub-Dimension	Indikator	Beschreibung
		processing, have used advanced spreadsheet functions, created a presentation or document integrating text, pictures and tables or charts, or written code in a programming language.
2b Advanced skills and development	2b1 ICT specialists	Employed ICT specialists. Broad definition based on the ISCO-08 classification and including jobs like ICT service managers, ICT professionals, ICT technicians, ICT installers and servicers.
	2b2 Female ICT specialists	Employed ICT specialists. Broad definition based on the ISCO-08 classification and including jobs like ICT service managers, ICT professionals, ICT technicians, ICT installers and servicers.
	2b3 ICT graduates	Individuals with a degree in ICT
Dimension 3: Use of internet services		
3a Internet use	3a1 People who never used the internet	Individuals who never used the internet
	3a2 Internet users	Individuals who used the internet at least once a week
3b Activities online	3b1 News	Individuals who used the internet to read online news sites, newspapers or news magazines
	3b2 Music, videos and games	Individuals who used the internet to play or download games, images, films or music
	3b3 Video on demand	Individuals who used the internet to use video on demand services
	3b4 Video calls	Individuals who used the internet to make telephone or video calls (e.g. Skype)
	3b5 Social networks	Individuals who used the internet to participate in social networks (create user profile, post messages or other contributions)
	3b6 Doing an online course	Individuals who used the internet to do an online course (on any subject)
3c Transactions	3c1 Banking	Individuals who used the internet to use online banking
	3c2 Shopping	Individuals who ordered goods or services online
	3c3 Selling online	Individuals who sold goods or services online
Dimension 4: Integration of digital technology		
4a Business digitisation	4a1 Electronic information sharing	Businesses who have in use an ERP (enterprise resource planning) software package to share information between different functional areas (e.g. accounting, planning, production, marketing)
	4a2 Social media	Businesses using two or more of the following social media: social networks, enterprise's blog or microblog, multimedia content sharing websites, wiki-based

Sub-Dimension	Indikator	Beschreibung
		knowledge sharing tools. Using social media means that the enterprise has a user profile, an account or a user license depending on the requirements and the type of the social media.
	4a3 Big data	Enterprises analysing big data from any data source
	4a4 Cloud	Businesses purchasing at least one of the following cloud computing services: hosting of the enterprise's database, accounting software applications, CRM software, computing power
4b e-Commerce	4b1 SMEs selling online	SMEs selling online (at least 1% of turnover)
	4b2 e-Commerce turnover	SMEs total turnover from e-commerce
	4b3 Selling online cross-border	SMEs that carried out electronic sales to other EU countries
Dimension 5: Digital public services		
5a e-Government	5a1 e-Government users	Individuals who sent filled forms to public authorities over the internet in the previous 12 months
	5a2 Pre-filled forms	Amount of data that is pre-filled in public service online forms
	5a3 Online service completion	The share of administrative steps that can be done online for major life events (birth of a child, new residence, etc.)
	5a4 Digital public services for businesses	The indicator broadly reflects the share of public services needed for starting a business and conducting regular business operations that are available online for domestic as well as foreign users. Services provided through a portal receive a higher score, services which provide only information (but have to be completed offline) receive a more limited score.
	5a5 Open data	This composite indicator measures to what extent countries have an open data policy in place (including the transposition of the revised PSI Directive), the estimated political, social and economic impact of open data and the characteristics (functionalities, data availability and usage) of the national data portal.

Anhang II. Datengrundlage für die Berechnung des Klima-Fußabdrucks an Beispielen

Die Datengrundlage für die Berechnung des Klima-Fußabdrucks für die drei ausgewählten Digitalanwendungen (siehe Abschnitt 4.7) beruht im Wesentlichen auf Daten, die im Rahmen eines kürzlich durchgeführten Projekts auf der Grundlage einer Literaturrecherche ergänzt mit eigenen Messungen und Ableitungen ermittelt wurden (Gröger 2020). Da dort die Datengrundlage eingehend erläutert wird, wird hier auf eine detaillierte Darstellung verzichtet. Die Datengrundlage umfasst zwei Bereiche: IKT-Endprodukte sowie IKT-Dienstleistungen.

IKT-Endprodukte

Geräte	Durch-schnittliche Nutzungs-dauer	Lebens-dauer Erst-nutzung	Treibhausgas-Emissionen Herstellung	Elektrische Leistungs-aufnahme Betrieb	Standby
Desktop-PC mit Monitor	2 h/d	5 Jahre	435 kg CO_2e	87 W	2 W
Laptop	2 h/d	5 Jahre	311 kg CO_2e	13 W	2 W
Computer-Monitor	-	5 Jahre	88 kg CO_2e	47 W	0 W
Fernseher	4 h/d	6 Jahre	1000 kg CO_2e	116 W	2 W
Tablet-PC	1 h/d	4 Jahre	200 kg CO_2e	4 W	0 W
Sprachassistent	1 h/d	3 Jahre	100 kg CO_2e	12 W	2,5 W
Smartphone	24 h/d	2,5 Jahre	100 kg CO_2e	1,3 W	
Router	24 h/d	7 Jahre	77 kg CO_2e	13 W	

IKT-Dienstleistungen

Dienstleistungen	Durchschnitt-liche Inan-spruchnahme Dienstleistung	Spezifischer Daten-verbrauch	Energieinten-sität Daten-übertragung	Elektrische Leistungs-aufnahme Betrieb
Datenmenge im mobilen Internet	5 GB pro Monat	-	0,252 kWh/GB	-
Datenmenge in kabelgebundenen Netzwerken	124 GB pro Monat	-	0,052 kWh/GB	4 W
Musikstreaming und IP-Telefonie	-	0,06 GB/h	0,052 kWh/GB	4 W
Videotelefonie, Videokonferenzen	-	0,5 GB/h	0,052 kWh/GB	4 W
Streaming von Filmen, niedrige Qualität	-	0,3 GB/h	0,052 kWh/GB	4 W
Streaming von Filmen, hohe Qualität	-	2 GB/h	0,052 kWh/GB	4 W
Online Storage	10 GB	-	-	30W/TB